உறைம இயற்பியல் - II

(Contensed Matter Physics - II)



முனைவர் மெ. மெய்யப்பன்



தமிழ்நாடு மாநில உயர்கல்வி மன்றம்
சென்னை - 600 005.

உறைம இயற்பியல் - II

முனைவர் மெ. மெய்யப்பன்



தமிழ்நாடு மாநில உயர்கல்வி மன்றம்
சென்னை - 600 005.

முதற்பதிப்பு : 2011

பதிப்புரிமை : தமிழ்நாடு மாநில உயர்கல்வி மன்றம்
சென்னை – 600 005.

நூலின் பெயர் : உறைம இயற்பியல் – II

நூலாசிரியர் : முனைவர் மெ. மெய்யப்பன்
பேராசிரியர். துறைத்தலைவர்
இராஜராஜன் தொழில்நுட்பக்கல்லூரி
அமராவதிப் பூதூர்.
காரைக்குடி – 630 301.

மறு ஆய்வு செய்தவர் : முனைவர் ஆர். சபேசன்.
பேராசிரியர், துறைத் தலைவர் (ஓய்வு),
இயற்பியல் துறை,
அழகப்பா பல்கலைக்கழகம்,
காரைக்குடி – 630 003

தமிழ் திருத்தம் செய்தவர் : திரு.எஸ். சந்திரசேகர்,
தமிழ் விரிவுரையாளர் (ஓய்வு),
தன்ராஜ் பெய்த் ஜெயின் கல்லூரி,
துரைப்பாக்கம்,
சென்னை – 600 097

விலை : ரூ. 98.00

அச்சிட்டோர் : பவர்மேன் பிரிண்டர்ஸ்
எண்.6-15, டாக்டர் ராதாகிருஷ்ணன் நகர்,
3வது தெரு, கொருக்குப்பேட்டை
சென்னை - 600 021.
செல் : 98846 99888

பொருளடக்கம்

1. ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கை

கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையின் இயலாமைகள் - ப்ளாக் தேற்றம் - நிரூபணம் - க்ரோனிக் - பென்னி மாதிரியமைப்பு - அலைச் சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலவெளியில் எலக்ட்ரான் - புறமின்புலப்பாதிப்பு.

எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறை - எதிர்குறியுடனான செயலுறுநிறைக்கான விளக்கம் - ஆற்றல் பட்டையில் ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கை.

ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கையும் கட்டற்ற எலக்ட்ரான் தோராயமும் - நெருக்கப் பிணைப்புத் தோராயம்.

பிரிலோயின் மண்டலங்கள் - பெர்மி பரப்புகள் - சைக்ளோட்ரான் ஒத்ததிர்வு

1. ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கை (Band theory of solids)

1.1. கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையின் இயலாமைகள்

ஒரு மாறாத அகமின்னழுத்தத்துடன் உலோகத்திற்குள் கடத்து எலக்ட்ரான்கள் தன்னிச்சையாக இயங்கவல்லன என்றும், தொல்லியக்க இயற்பியல் விதிகளுக்கு உட்பட்ட வளிமநிலைத் துகள்களைப் போன்று செயல்படுகின்றன என்றும், பெர்மி - டிராக் புள்ளியியல் கொள்கைக்குக் கட்டுப்பட்டு இயங்குகின்றன என்றும் நாம் சென்ற அத்தியாயங்களில் பார்த்தோம். கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையும் சில குறைபாடுகளைக் கொண்டுள்ளது என்பதையும் அறிந்து கொண்டோம்.

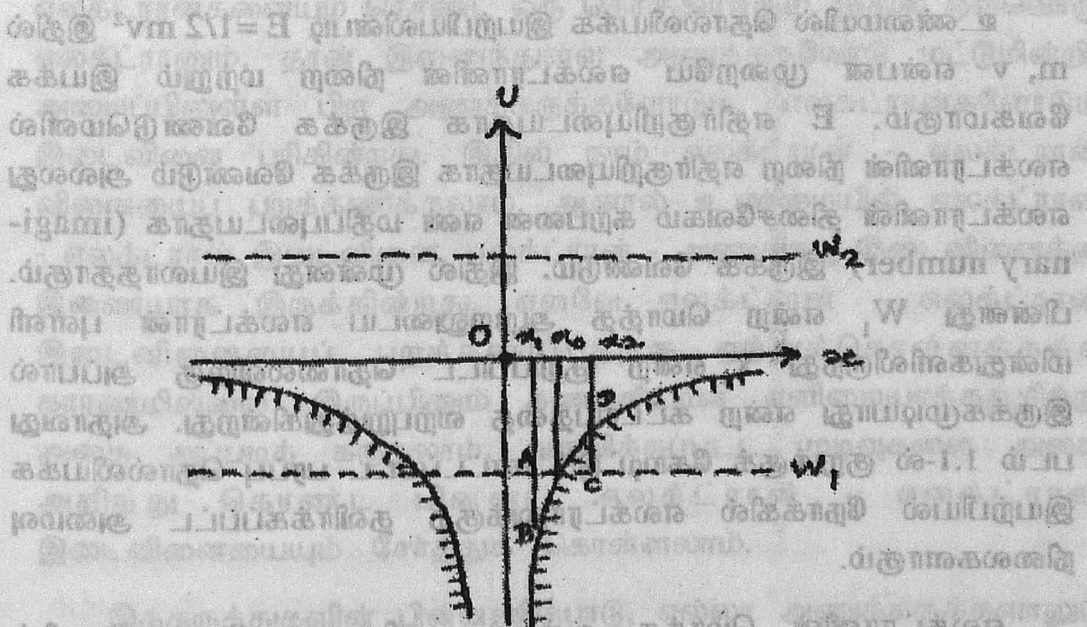
கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கை உலோகங்களின் சில பண்புகளைக் குறிப்பாக, வெப்ப ஏற்புத்திறன், மின்கடத்துதிறன், எலக்ட்ரானின் பாராகாந்தம், வெப்ப உமிழ்வு போன்றவற்றைத் தெளிவாக விளக்கினாலும், உலோகங்களின் வேறுபட்ட மின் மற்றும் வெப்பங்கடத்து திறனுக்கான காரணத்தை எடுத்துக்கூற முடியவில்லை. கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் செறிவு சில உலோகங்களில் அதிகமாகவும், வேறுசில உலோகங்களில் குறைவாகவும் ஏன் இருக்கின்றன என்பதைக் கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கைமூலம் தெரிந்து கெள்ள முடியவில்லை. எளிதில் கடத்திகள், அரிதில் கடத்திகள், மற்றும் குறைக்கடத்திகள் என முற்றிலும் மாறுபட்ட மின்கடத்தும் தன்மைகளைக் கொண்ட திண்மப் பொருள் நிலைகளைப் பாகுபடுத்தி விளக்கும் தன்மை கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கைக்கு இல்லை.

மின்கடத்துதிறன் பொதுவாக எலக்ட்ரான் செறிவிற்கு நேர் விகிதத்திலிருந்தும், ஈரிணைதிறன் மற்றும் மூவிணைதிறன் கொண்ட உலோகங்கள் ஓரிணைதிறன் கொண்டனவற்றைவிடக் குறைவான மின்கடத்தும் தன்மை கொண்டிருப்பதற்கும், எதிர்குறியுடனான ஹால் மாறிலி மட்டுமின்றி நேர்குறி உடைய ஹால்மாறிலி இருப்பதற்கும் கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையில் விளக்கமில்லை. இக்குறைபாடுகளைப் படிக அணித்தளத்துடன் எலக்ட்ரான்களுக்குள்ள இடையீட்டுச் செயல்களைக் கொண்டு ஓரளவு விளக்கமுடியும்.

இதுவே ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கைக்கு அடிப்படையாக இருக்கின்றது.

1.2. புலவெளியில் தனி எலக்ட்ரான்

ஒரு தனி எலக்ட்ரானின் இயக்கமும் ஆற்றலும் அது இயங்கும் வெளியிலுள்ள புலத்தின் தன்மையைப் பொறுத்தது. தொல்லியக்க இயற்பியலில் ஓர் எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் தொடர்ச்சியான நெடுக்கைக்குட்பட்ட எந்த மதிப்புகளையும் கொண்டிருக்கலாம். ஆனால் குவாண்டம் கொள்கை விட்டுவிட்டுள்ள குவாண்டம் ஆற்றல்களை மட்டுமே எலக்ட்ரான்கள் பெற்றிருக்க முடியும் என்று உறுதியாக நிறுவியுள்ளது. எடுத்துக்காட்டாக ஓரணுவில் நேர்மின்னூட்டங்கொண்ட அணுக்கருவைச் சுற்றி இணைதிறன் கொண்ட ஓர் எலக்ட்ரான் இயங்குவதாகக் கொள்வோம். அணுவின் உள்ளகத்தை (core) ஒரு புள்ளி மின்துகளாகக் கருதலாம். அப்போது இணைதிறன் கொண்ட எலக்ட்ரான் இப்புள்ளி மின்துகளின் கூலும் புலத்தில் இயங்குவதாகக் கொள்ளப்படும். எலக்ட்ரானின் நிலையாற்றல் Uவைப் (x) பொறுத்தது. Uவிற்கும் xக்கும் உள்ள வரைபடம் படம் 1.1ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம் 1.1. தனி அணுவில் இயங்கும் எலக்ட்ரானின் நிலையாற்றலுக்கும், இடைத்தொலைவிற்குமுள்ள தொடர்பு

புலவெளியில் நிலை காரணமாக நிலையாற்றலையும், இயக்கம் காரணமாக இயக்க ஆற்றலையும் எலக்ட்ரான் பெற்றிருக்கும். புள்ளி மின் துகளை விட்டு விலகிச் செல்லச்செல்ல அதன் நிலையாற்றல் அதிகரிக்கின்றது. ஆனால் அதன் மொத்த ஆற்றல் (இது எலக்ட்ரானின் நிலையாற்றல், மற்றும் இயக்க ஆற்றலின் கூடுதலாகும்) W, x-ன் மதிப்பைச் சார்ந்திருப்பதில்லை. படம் 1.1.-ல் இது கிடைமட்டக் கோட்டின் மூலம் காட்டப்பட்டுள்ளது. w_1, w_2 என்பன அனுமதிக்கப்படுகின்ற தாழ்ந்த மற்றும் உயர் ஆற்றல் நிலைகள் எனக் கொள்ளலாம்.

எலக்ட்ரானின் இயக்க ஆற்றல் $E = W - U$ என அறிவோம். எலக்ட்ரானின் மொத்த ஆற்றல் W_1 என்றிருக்கும்போது x_1 என்ற அமைவு நிலையில், அதன் இயக்க ஆற்றல் AB-ஆல் குறிப்பிடப்படுகின்றது. ஆனால் எலக்ட்ரான் x_2 என்ற அமைவு நிலையில் இருக்கும்போது, அதன் இயக்க ஆற்றல் CD ஆல் குறிப்பிடப்படுகின்றது. இந்நிலையில் $W < U$ என்பதால் $E < 0$, அதாவது இயக்க ஆற்றல் எதிர்குறித் தன்மையுடையதாக இருக்கின்றது. இது நடைமுறைச் சாத்தியமில்லை.

உண்மையில் தொல்லியக்க இயற்பியலின்படி $E = 1/2\, mv^2$ இதில் m, v என்பன முறையே எலக்ட்ரானின் நிறை மற்றும் இயக்க வேகமாகும். E எதிர்குறியுடையதாக இருக்க வேண்டுமெனில் எலக்ட்ரானின் நிறை எதிர்குறியுடையதாக இருக்க வேண்டும் அல்லது எலக்ட்ரானின் திசைவேகம் கற்பனை எண் மதிப்புடையதாக (imaginary number) இருக்க வேண்டும். இதில் முன்னது இயலாததாகும். பின்னது W_1 என்ற மொத்த ஆற்றலுடைய எலக்ட்ரான் புள்ளி மின்துகளிலிருந்து x_0 என்ற குறிப்பிட்ட தொலைவிற்கு அப்பால் இருக்கமுடியாது என்ற கட்டாயத்தை வற்புறுத்துகின்றது. அதாவது படம் 1.1-ல் குறுக்குக் கோடிட்டுக் காட்டப்பட்ட பரப்பு தொல்லியக்க இயற்பியல் நோக்கில் எலக்ட்ரானுக்குத் தவிர்க்கப்பட்ட அமைவு நிலைகளாகும்.

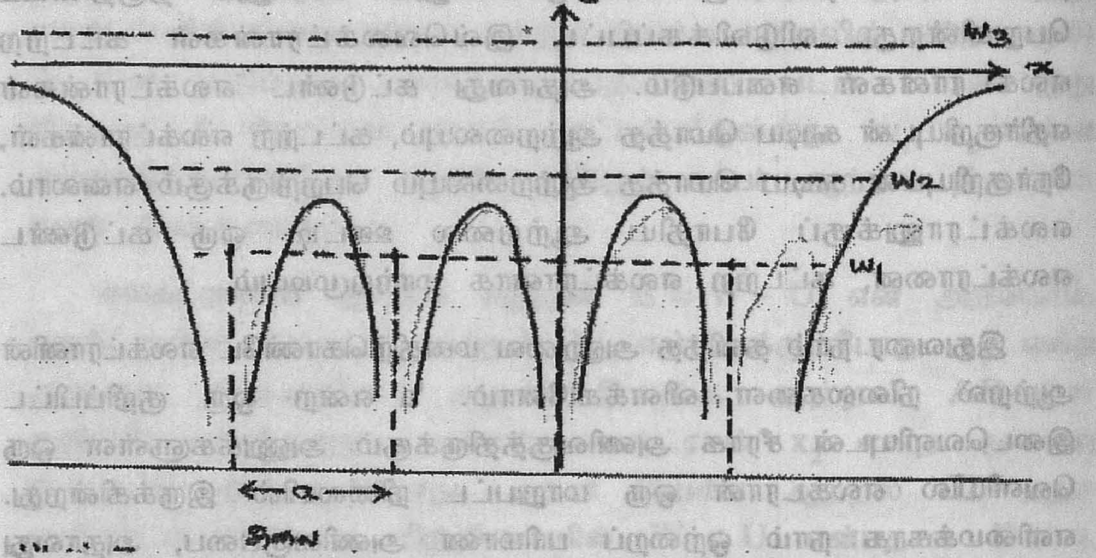
எலக்ட்ரானின் மொத்த ஆற்றல் அதிகமாக இருக்குமெனில் அதாவது W_1 மேல்நோக்கி நகர, எலக்ட்ரானுக்கு அனுமதிக்கப்படும் பகுதியின் எல்லை விரிந்து கொண்டே செல்கின்றது. இவ்வெலக்ட்ரான்கள் கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்கள் (bound electrons) எனப்படும்.

எலக்ட்ரானின் மொத்த ஆற்றல் அதன் நிலையாற்றலை விடக் கூடுதலாக இருக்கப்பெற்றால், அதை படத்தில் w_2 போலக் காட்டலாம். இந்நிலையில் $E > 0$ என்பதால், எலக்ட்ரானானது தன்னிச்சைப்படி எங்கு வேண்டுமானாலும் செல்லும் தகுதியைப் பெறுகின்றது. விடுவிக்கப்பட்ட இவ்வெலக்ட்ரான்கள் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் எனப்படும். அதாவது கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்கள் எதிர்குறியுடன் கூடிய மொத்த ஆற்றலையும், கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள், நேர்குறியுடன் கூடிய மொத்த ஆற்றலையும் பெற்றிருக்கும் எனலாம். எலக்ட்ரானுக்குப் போதிய ஆற்றலை ஊட்டி, ஒரு கட்டுண்ட எலக்ட்ரானை, கட்டற்ற எலக்ட்ரானாக மாற்றமுடியும்.

இதுவரை நாம் தனித்த அணுவை மனதிற்கொண்டே எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் நிலைகளை விளக்கினோம். 'a' என்ற ஒரு குறிப்பிட்ட இடைவெளியுடன் சீராக அணிவகுத்திருக்கும் அணுக்களுள்ள ஒரு வெளியில் எலக்ட்ரான் ஒரு மாறுபட்ட நிலையில் இருக்கின்றது. எளிமைக்காக நாம் ஒற்றைப் பரிமாண அணிவகுப்பை, அதாவது ஒரே நேர் கோட்டில் 'a' என்ற இடைவெளியுடன் அமைந்திருக்கும் அணுக்களைக் கருதுவோம். இது பல அணுக்கருக்களையும், எலக்ட்ரான்களையும் கொண்ட ஒரு தொகுதியாகும். இதில் ஒவ்வொரு எலக்ட்ரானும், தான் இணைந்துள்ள அணுக்கருவோடு மட்டுமின்றி, அமைப்பிலுள்ள பிற அணுக்கருக்களோடும், எலக்ட்ரான்களோடும் இடைவினை புரிகின்றது. இதில் நாம் எலக்ட்ரான் - எலக்ட்ரான் வினையைப் புறக்கணிக்கலாம். ஆனால் உண்மையில் எலக்ட்ரான் - எலக்ட்ரான் இடைவினை, எலக்ட்ரான் - அணுக்கரு இடைவினைக்கு இணையாக இருக்கின்றது. எனவே எலக்ட்ரான் - எலக்ட்ரான் இடைவினையைப் புறக்கணிப்பதற்கு ஏற்றுக்கொள்ளத்தக்க காரணமில்லை. இருப்பினும் கணக்கீட்டின் எளிமையாக்கத்திற்கு அதை அப்படிக் கருதலாம். வருவிக்கப்பட்ட முடிவுகளை அலசி அறிந்து கொண்ட பின்னர், எலக்ட்ரான் - எலக்ட்ரான் இடைவினையையும் சேர்த்துக் கொள்ளலாம்.

இக்கருத்துகளின் பின்னணியோடு, எல்லா அணுக்கருக்களாலும் தோற்றுவிக்கப்படும் ஒரு பொதுவான புலத்தில் ஒவ்வொரு எலக்ட்ரானும் இயங்குகின்றன என்ற ஒரு மாதிரியமைப்பைக் கருதலாம். இப்புலவெளியிலும் ஓர் எலக்ட்ரான் பெற்றிருக்கும் நிலையாற்றலை ஒரு வரைகோட்டுப்படம் மூலம் காட்ட முடியும்.

இதில் தனித்த அணுவில் இயங்கும் எலக்ட்ரானுக்குள்ள, வரைகோடுகள், அணி அமைப்புள்ள அணுக்களுக்கு ஏற்றவாறு, அதே இடைவெளியுடன் வரிசைத் தொடரில் அமைந்திருக்கும்.



படம்.1.2 அலைச்சீர்மை கொண்ட அணித்தளத்தில் இயங்கும் எலக்ட்ரானின் நிலையமுத்தம்.

இவ்வகையான அகப்புலத்தை அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலை மின்னழுத்தப்புலம் (periodic potential) என்பர். இச் சூழலில் ஓர் எலக்ட்ரானின் இயக்கம் எங்ஙனம் வேறுபடுகின்றது எனப் பார்ப்போம்.

எலக்ட்ரான் தனக்குரிய அணுக்கருவோடு சேர்ந்திருப்பதும், அல்லது படிக அணித்தளத்தில் எளிதாக இயங்கும் தன்மை பெற்றிருப்பதும், அது பெற்றிருக்கும் மொத்த ஆற்றலைப் பொறுத்தது. அந்த வகையில் எலக்ட்ரான் மூன்று நிலைகளில் இருக்கமுடியும். மொத்த ஆற்றல் w_2 என்ற ஆற்றல் மட்டத்தால் குறிப்பிடப்படுவதாக இருப்பின், எலக்ட்ரான் படிக அணித்தளத்தில் சுதந்திரமான இயக்கத்தைப் பெறுகின்றது. ஆனால் படிக விளிம்பில் மின்னழுத்தத் தடுப்புச் சுவரின் அமைப்பு காரணமாக அவ்வெலக்ட்ரான் படிகத்தை விட்டு வெளியேறிச் செல்லும் வலிமையற்றதாக இருக்கும். இவ்வெலக்ட்ரான்களே உலோகத்தின் மின் மற்றும் வெப்பங்கடத்தும் திறனுக்குக் காரணமாக இருக்கின்றன. மொத்த ஆற்றல் w_3 என்ற ஆற்றல் மட்டத்தால் குறிப்பிடப்படுவதாக இருந்தால், எலக்ட்ரான் படிக அணித்தளத்தில் மட்டுமின்றி, படிகத்திற்கு அப்பாற்பட்ட

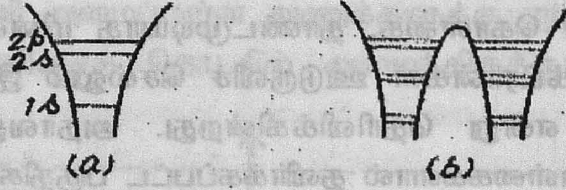
வெளியிலும் இயங்கும் வலிமையைப் பெறுகின்றது.

குவாண்டம் கொள்கை, தாண்டமுடியாத மின்னழுத்தத் தடுப்புச் சுவரையும் எலக்ட்ரான்கள் ஊடுருவிச் செல்லும் இயல்புடையனவாக இருக்கின்றன என்று தெரிவிக்கின்றது. அதாவது தொல்லியக்க இயற்பியல் கொள்கைகளால் தவிர்க்கப்பட்ட பகுதிகளிலும் எலக்ட்ரான் இருப்பதை வாய்ப்புகளின் அடிப்படையில் குவாண்டம் கொள்கை அனுமதிக்கின்றது. w_1 என்ற மொத்த ஆற்றலுடைய எலக்ட்ரான் $w_1 < u$ என்ற தவிர்க்கப்பட்ட பகுதிக்குள் ஊடுருவ முடியும். இப்படி ஊடுருவுவதற்கான வாய்ப்பு, மின்னழுத்தத் தடுப்புச் சுவரின் உயரமும் அகலமும் குறைவாக இருப்பின் அதிகமாக இருக்கும். இதை ஊடுருவித் தாண்டுதல் (tunnelling) என்பர். இதன் மூலம் குவாண்டம் கொள்கை, கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்களை, சிறிது குறைவாகக் கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்களாக மாற்றுகின்றது. அதாவது கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்கள் தனித்து இயங்க ஓர் எழுச்சியைப் பெறுகின்றது.

திண்மப் பொருட்களின் ஆற்றல் நிறமாலை (அணு, மூலக்கூறு திண்மப்பொருள்)

மேற்குறிப்பிட்ட கருத்துகளை தக்க எடுத்துக்காட்டுடன் விவரமாக அறிந்து கொள்வோம். ஒரு தனித்த லித்தியம் அணுவில் மூன்று எலக்ட்ரான்கள் உள்ளன. அதிலுள்ள குவாண்டம் ஆற்றல் நிலைகளை 1s, 2s, 2p ... என்று குறிப்பிடுவர். லித்தியத்தின் முதலிரு எலக்ட்ரான்கள் 1s கூட்டிலும், மூன்றாவது எலக்ட்ரான் 2s கூட்டிலும் இருக்கும். இவையாவும் கட்டுண்ட இணைதிற எலக்ட்ரான்களாகும்.

இரு லித்திய அணுக்களுடன் கூடிய லித்திய மூலக்கூறில் குவாண்ட ஆற்றல் நிலைகள் இரட்டிப்பாகின்றன. இவை தனித்த அணுவில் காணப்பட்ட முக்கிய ஆற்றல் நிலைகளைப் போலன்றி, மிக நெருக்கமாக அமைந்திருக்கின்றன. படம் 1.3.



(அ) லித்திய அணு (ஆ) லித்திய மூலக்கூறு

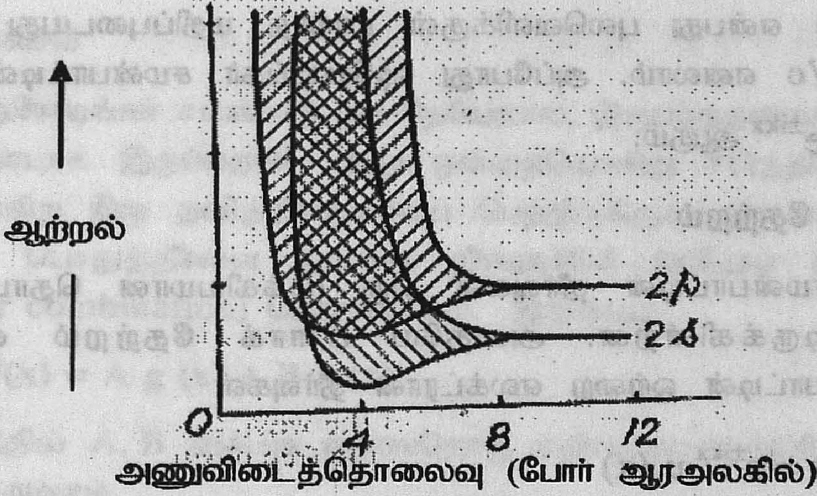
2p புறப்பரப்பு
2s
1s
(C)

(இ) லித்திய உலோகம்

படம். 1.3. லித்திய அணு, மூலக்கூறு, உலோகங்களில் எலக்ட்ரான் ஆற்றல் நிலைகள்.

இரு லித்திய அணுக்கள் மிகவும் விலகி இருந்தால் ஓர் அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்மீது மற்றோர் அணுவின் தாக்கம் மிகவும் சொற்பமாக இருக்கும். அவை நெருங்கி வரும்போது, 1s எலக்ட்ரான், இரு அணுக்களிலுமுள்ள 1s ஆற்றல் நிலையில் இருக்கும் வாய்ப்பைப் பெறுகின்றது. அதாவது அந்த ஆற்றல் நிலை இருபடிச் சீர்குலைவிற்கு (doubly degenerate) ஆளாகின்றது. இச்சீர்குலைவு இரு அணுக்களுக்கிடைப்பட்ட தொலைவைப் பொறுத்தது. நெருக்கமாக இருந்தால், ஆற்றல் நிலைகளின் பிரிதல் தீவிரமாகவும் எண்ணிக்கையால் அதிகமாகவும் இருக்கும். எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதையைப் பொருத்தும் இது அமையும். எனவே ஆற்றல் நிலை பிரிதல், 2s எலக்ட்ரான்களைக் காட்டிலும் 2p எலக்ட்ரான்களுக்கு கூடுதலாகவும், இவை 1s எலக்ட்ரான்களைக் காட்டிலும் கூடுதலாகவும் இருக்கும். மேலும் மூவணுக்களின் சேர்க்கையில் முப்படித்தான சீர்குலைவும், நான்கு அணுக்களின் சேர்க்கையில் நான்குபடித்தான சீர்குலைவும், எனச் சீர்குலைவின் எண்ணிக்கை அமைப்பிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கைக்குத் தக்கவாறு அதிகரித்துக் கொண்டே செல்கின்றது. அமைப்பில் N அணுக்கள் சேர்ந்திருப்பின், ஒவ்வொரு ஆற்றல் நிலையும் N எண்ணிக்கையுடைய நெருக்கமான ஆற்றல் நிலைகளாகப் பிரியும். திண்மப் பொருளில் N-ன் மதிப்பு மிக அதிகமாக இருப்பதால், இப்படிப் பிரியும், ஆற்றல் நிலைகள் ஒருங்கிணைந்து ஓர்

ஆற்றல் பட்டை வடிவில் தோன்றும். இரு ஆற்றல் பட்டைகளுக்கிடைப்பட்ட வெளியைத் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளி (energy gap) என்பர். இப்படித் தனி ஆற்றல் நிலைகள், ஆற்றல் பட்டையாக விரிதல் என்பது பெரும்பாலான திண்மப் பொருட்களின் அடிப்படைப் பண்பாகும்.



படம். 1.4 திண்ம லித்தியத்தில் அணுவிடைத் தொலைவிற்கு ஏற்ப மாறும் ஆற்றல் பட்டை அமைப்பு

படம் 1.4 திண்ம லித்தியத்தில் அணுவிடைத் தொலைவிற்கு ஏற்ப மாறும் 2s, 2p ஆற்றல் பட்டைகளின் அமைப்பு காட்டப்பட்டுள்ளது. அணுவிடைத் தொலைவு குறையக் குறைய ஆற்றல் பட்டையின் அகலம் அதிகரிப்பதை இது புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றது. அணுவிடைத் தொலைவு போர் ஆர அலகில் 6 மடங்கிற்கும் குறைவாக இருக்கும்போது 2s, 2p ஆற்றல் பட்டைகள் ஒன்றின் மேல் ஒன்று மேற்பொருந்திக் குறுக்கீட்டுக் கொள்கின்றன.

1.3. அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலை அழுத்தப்புலத்தில் எலக்ட்ரானின் அலை சமன்பாடும் ப்ளாக் தேற்றமும்

அலைச் சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலத்தில் எலக்ட்ரானின் இயக்கப் பண்புகளைக் கொள்வதற்கு நாம் ஒற்றைப்பரிமாண வெளியில் 'a' என்ற இடைத்தொலைவுச் சீர்மையுடன் கூடிய அலைச் சீர்மை கொண்ட நிலைமின் புலத்தைக் கருதுவோம். இதில் எலக்ட்ரானின் நிலையாற்றல் $V(x) = V(x+a)$ என்ற நிபந்தனைக்கு உட்பட்டு சுற்றுமுறையில் மதிப்பு மாறுகின்றது. $V(x)$ என்ற சீரான

நிலையாற்றலுடன் இயங்கும் எலக்ட்ரானை ஷ்ரோடிங்கர் அலைச்சமன்பாட்டால் குறிப்பிடலாம்.

$$d^2\psi / dx^2 + 2m / h^2 [E - V(x)] \psi = o \qquad (1.1)$$

இதில் h என்பது h/2 π

V(x) என்பது புலவெளிக்குள் மாறாத மதிப்புடையது எனில் V(x) = Vo எனலாம். அப்போது ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வு $\psi(x) = e^{\pm ikx}$ ஆகும்.

ப்ளாக் தேற்றம்

இச்சமன்பாட்டின் தீர்வுகள் ஒரு முக்கியமான தொடர்புக்கு உட்பட்டிருக்கின்றன. அதையே ப்ளாக் தேற்றம் என்பர். இச்சமன்பாட்டின் ஒற்றை எலக்ட்ரான் தீர்வுகள்

$$\psi(x) = e^{\pm ikx} u_k(x) \qquad (1.2)$$

என்றபடி அமைந்திருக்கின்றன. இதில் $u_k(x)=u_k(x+a)$ என்றவாறுள்ளது. அதாவது அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலத்தில் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வுகள் யாவும், படிக அணித்தளத்தின் அதே அலைச் சீர்மையுடன் கூடிய சார்பான $u_k(x)$-ஆல் பண்பேற்றம் செய்யப்பட்ட ஒரு தள அலைகளாக $e^{ikx} u_k(x)$ உள்ளன. இதுவே ப்ளாக் தேற்றத்தின் சுருக்கமாகும். இச்சிறப்புத் தீர்வுகளை ப்ளாக் சார்புகள் என்பர். வகைக்கெழு சமன்பாடுகள் பற்றிய கணிதத்தில் இதை புளோக்கெட் தேற்றம் (Floquets theorem) என்பர்.

ப்ளாக் சார்பின் பண்பு

$\psi(x) = e^{\pm ikx} u_k(x)$ என்ற ப்ளாக் சார்பு கீழ்கண்ட சில முக்கியப் பண்புகளைக் கொண்டுள்ளது. x = x + a எனில்,

$$\psi(x+a) = e^{\pm ik(x+a)} u_k(x+a)$$

$u_k(x) = u_k(x+a)$ என்பதால்

$$\psi(x+a) = \psi(x). e^{\pm ika} = \lambda \psi(x). \qquad (1.3)$$

இதில் λ என்பது ஒரு மாறிலி.

$$\lambda = e^{+ika}$$

கொடுக்கப்பட்ட படிக அணித்தளச் சீர்மையுடன் கூடிய நிலையழுத்தப்புலத்தில் இயங்கும் எலக்ட்ரானின் அலைசார்புகள் இத்தன்மையுடையதாக இருக்கின்றன.

நிருபணம்

ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாடு ஒரு நேரியலான, இருபடித்தன்மை கொண்ட சமன்பாடாக இருப்பதால், அது ஒன்றையொன்று சார்ந்திராத g(x), h(x) என்ற இரு தனித்தீர்வுகளைப் பெற்றிருக்கும் எனலாம். எனவே இதன் பொதுத்தீர்வை இவ்விரு தீர்வுகளின் நேரியல் கலப்பாகக் (linear combination) கொள்ளலாம். இதன்படி

$$\Psi(x) = A\, g(x) + B\, h(x)$$

இதில் A, B என்பன ஏதாவதொரு மதிப்புடைய மாறிலிகளாகக் கொள்ளலாம்.

f (x+a) = f (x) என்பதால், g (x), h(x) மட்டுமின்றி g (x+a), h (x+a) போன்ற தீர்வுகளும் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வுகளாக அமையும் எனலாம். இதனால் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் எல்லாத் தீர்வுகளும் g (x), h (x) ஆகியவற்றின் நேரிய கலப்பினால் குறிப்பிடக் கூடியவைகளாக இருக்கும். இதன்படி

$$g(x+a) = \alpha_1 g(x) + \alpha_2 h(x).$$
$$h(x+a) = \beta_1 g(x) + \beta_2 h(x)$$

இதில் α_1, α_2, β_1, β_2 என்பன ஆற்றலைச் சார்ந்த மாறிலிகளாகும்.

பொதுத்தீர்வில் x = x + a என்று பதிலீடு செய்ய

$$\psi(x+a) = A\, g(x+a)\, B\, k(x+a)$$
$$= A[\alpha_1 g(x) + \alpha_2 h(x)] + B[\beta_1 g(x) + \beta_2 h(x)]$$
$$= (A\alpha_1 + B\beta_1)\, g(x) + (A\alpha_2 + B\beta_2)\, h(x)$$

ஆனால் $\psi(x+a) = \lambda \psi(x) = \lambda A g(x) + \lambda B h(x)$ என்பதால், இவ்விரு தொடர்புகளையும் ஒப்பிடலாம். g(x) ன் குணகங்களைக் கருத

$$\alpha_1 A + \beta_1 B = \lambda\beta \quad \text{அல்லது} \quad (\alpha_1 - \lambda) A + \beta_1 B = o$$

h(x)-ன் குணகங்களைக் கருத

$$\alpha_2 A + \beta_2 B = \lambda A \quad \text{அல்லது} \quad \alpha_2 A + (\beta_2 - \lambda) B = o$$

A,B-யைப் பற்றிய சீரான இச்மன்பாடுகள் A = B = o என்பதைத் தவிர்த்த பிற தீர்வுகளைப் பெற்றிருக்க வேண்டுமானால், அதற்கான நிபந்தனை, குணகங்களாலான அணிக்கோவை (determinant) யின் மதிப்பு சுழியாக இருக்க வேண்டும்.

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 - \lambda & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \lambda \end{vmatrix} = 0$$

அல்லது $\lambda^2 - (\alpha_1 + \beta_2)\lambda + \alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1 = 0$. $\alpha_1\beta_2 - \alpha_2\beta_1 = 1$ என்று நாம் கணிதவியல் முறைப்படி நிறுவமுடியும்.

g(x), h(x) என்பன ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தனித்தீர்வுகள் என்பதால்,

$$-(h^2/2m)\ d^2g(x) / dx^2 + V(x)\, g(x) = E\, g(x)$$

$$-(h^2/2m)\ d^2h(x) / dx^2 + V(x)\, h(x) = E\, h(x)$$

இதில் முதன் சமன்பாட்டை h(x) ஆலும், இரண்டாவது சமன்பாட்டை g(x) ஆலும் பெருக்கி, பின்னர் ஒன்றிலிருந்து ஒன்றைக் கழிக்க

$$-h^2/2m\, [h(x)\, d^2g(x) / dx^2 - g(x)\, d^2 h(x) / dx^2] = o$$

$h^2/2m = 0$ என்பதால், பகர அடைப்பிற்குள் இருப்பவை சுழியாக இருக்கவேண்டும் எனலாம்.

$$h(x)\left[d^2 g(x) / dx^2\right] - g(x)\left[d^2 h(x) / dx^2\right] = 0$$

இதை

$$hg'' - gh'' = 0$$

என்று சுருக்கமாகக் குறிப்பிடலாம். இதை

$$d/dx[hg' - gh'] = 0$$

என்று எழுதலாம். இது $hg' - gh' =$ மாறிலி எனத் தெரிவிக்கின்றது. அதாவது

$$\begin{vmatrix} g(x) & h(x) \\ g'(x) & h'(x) \end{vmatrix} = \text{மாறிலி}$$

$g(x)$, $h(x)$ போல $g(x+a)$, $h(x+a)$யும் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டிற்குத் தீர்வாகின்றன. எனவே இதை,

$$\begin{vmatrix} g(x+a) & h(x+a) \\ g'(x+a) & h'(x+a) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} g(x) & h(x) \\ g'(x) & h'(x) \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \beta_1 & \beta_2 \end{vmatrix} = \text{மாறிலி}$$

என்று நிறுவலாம். இவ்விரு அணிக்கோவை சமன்பாடுகளையும் ஒப்பிட

$$\begin{vmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 \\ \beta_1 & \beta_2 \end{vmatrix} = 1$$

அதாவது $\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1 = 1$ என்ற முடிவைப் பெறலாம். எனவே

$$\lambda^2 - (\alpha_1 + \beta_2)\lambda + 1 = o \qquad (1.4)$$

இதில் $\alpha_1 + \beta_2$ என்பது E யைச் சார்ந்த உண்மை மதிப்புக்களைக் கொண்டவை. எனவே இவ்விருபடிச் சமன்பாடு இருதீர்வுகளைத் தரும் எனலாம். அவற்றை λ_1, λ_2 என்போம். அவை முறையே

$$\left.\begin{aligned}\lambda_1 &= (\alpha_1 + \beta_2) + \sqrt{(\alpha_1 + \beta_2)^2 - 4 / 2} \\ \lambda_2 &= (\alpha_1 + \beta_2) - \sqrt{(\alpha_1 + \beta_2)^2 - 4 \ / 2}\end{aligned}\right\} \quad (1.5)$$

எனவே $\Psi_1(x)$, $\Psi_2(x)$ என்ற இரு சார்புகள் $\Psi_1(x+a) = \lambda_1 \Psi_1(x)$, $\Psi_2(x+a) = \lambda_2\Psi_2(x)$ என்ற வரையறுக்கப்பட்ட நிபந்தனைக்கு உட்பட்டுத் தோன்றுவதாகக் கூறலாம். λ_1, λ_2-ன் மதிப்புகளைக் கொண்டு λ_1, $\lambda_2 = 1$ என்றும் நிறுவலாம்.

இருவேறு நிலைகளைக் கருத்திற்கொண்டு இத்தீர்வுகளை நாம் இப்போது அணுகுவோம்.

நிலை. 1

$(\alpha_1 + \beta_2)^2 < 4$ என்ற நிபந்தனைக்கு உட்பட்டவாறு ஆற்றல் நெடுக்கைக்குள் ஆற்றல் இருப்பின் λ_1, λ_2 ஆகிய இரு தீர்வுகளும் கூட்டு எண்ணாக இருக்கும். $\lambda_1, \lambda_2 = 1$ என்பதால் அவையிரண்டும் இணைக் கூட்டு எண்களாக (Complex conjugate) இருக்கும். எனவே

$$\lambda_1 = e^{ika}; \lambda_2 = e^{-ika}$$

என்று மதிப்புக் கொடுக்கலாம். இதைக்கொண்டு $\Psi_1(x)$, $\Psi_2(x)$ சார்புகளை,

$$\psi_1(x + a) = e^{ika} \psi_1(x)$$

$$\psi_2(x+a) = e^{-ika} \psi_2(x)$$

என்று நிறுவலாம். இப்பண்புள்ள சார்புகளையே ப்ளாக் சார்புகள் என அழைப்பர். எனவே இவ்வெளியில் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வுகளாக ப்ளாக் சார்புகளைக் கொள்ளலாம் என்பது தெளிவு.

நிலை. 2

$(\alpha_1 + \beta_2)^2 > 4$ எனில், λ_1, λ_2 ஆகியனவற்றின் மதிப்புகள் உண்மை இயல் நிலை மதிப்புகளை மட்டுமே பெற்றிருக்கும். இவற்றின் பெருக்கல் பலன் எப்போதும் ஒன்றாக இருப்பதால், ஒன்றின் மதிப்பு, மற்றொன்றின் தலைகீழ் பின்ன மதிப்பாக இருக்கும். இந்நிலையில் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வுகளாக

$$\psi_1(x) = e^{\mu x} u(x)$$
$$\psi_2(x) = e^{-\mu x} u(x)$$

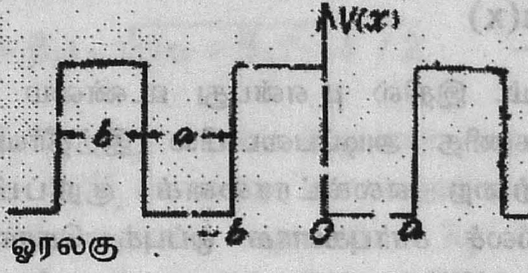
என்று காட்டலாம். இதில் μ என்பது உண்மை இயல்பு நிலை மதிப்புள்ளதாகும். கணித அடிப்படையில் இத்தீர்வுகள் வலுவாக இருந்தாலும், இவற்றை எலக்ட்ரானைக் குறிப்பிடும், ஏற்றுக் கொள்ளத்தக்க அலைச் சார்புகளாக ஒப்புக் கொள்வதற்கில்லை. ஏனெனில் $\Psi(x + na) / \Psi(x)$ என்ற தகவு, n-ன் மதிப்பு அனந்தத்தை நோக்கி அதிகரிக்க (∞ அல்லது $-\infty$) , அனந்தமாகின்றது. எலக்ட்ரான் இயங்கும் புலவெளியில் அதன் அலைச்சார்பு அனந்தமல்லாத, ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்பைப் பெற்றிருக்கவேண்டும் என்பதை அவ்வெளியில் எலக்ட்ரான் இருக்கும் வாய்ப்பு பற்றிய விளக்கம் தெரிவிக்கின்றது. எனவே உண்மை மதிப்பைப் பெற்றுள்ளவாறு மூலத்தீர்வுகளைக் கொண்ட ஆற்றல் பகுதிகளில் எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் நிலைகள் இருக்கமுடியாது. ஆனால் நிலை 1-ல் இத் தகவு அனந்தமில்லாமல், ஒரு குறிப்பிட்ட வரம்பிற்கு உட்பட்ட மதிப்புகளைக் கொண்டுள்ளது.

$$[\Psi(x + na)] = [\Psi(x)]$$

இவ்விரு நிபந்தனைக்குட்பட்ட ஆற்றல் வெளியில் ஒன்றில் எலக்ட்ரான் அனுமதிக்கப்படுவதால், அப்பகுதியை அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் நிலைத் தொகுதிகள் அல்லது ஆற்றல் பட்டைகள் என்றும், மற்றொரு பகுதியில் எலக்ட்ரான் அனுமதிக்கப்படாததால், அப்பகுதியைத் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்நிலைத் தொகுதிகள் அல்லது ஆற்றல் பட்டைகள் என்றும் கூறலாம்.

1.4. க்ரோனிக் - பென்னி மாதிரி அமைப்பு (Kronig - Penney Model)

ஓற்றைப் பரிமாண வெளியில் அலைச் சீர்மை கொண்ட ஒரு நிலையழுத்தப் புலத்தில் எலக்ட்ரானின் இயக்கத்தைப்பற்றித் தெரிவிப்பது க்ரோனிக் - பென்னி மாதிரியமைப்பாகும். இது மிகவும் செயற்கையான அமைப்பே என்றாலும், ஆற்றல் மண்டலங்களின் உருவாக்கத்தையும், வடிவமைப்பையும் நேரடியாகப் புலப்படுத்திக் காட்டக்கூடியதாக இருப்பதால், ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கையில் முக்கியத்துவம் பெறுகின்றது.



படம். 1.5. அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப்புலம் (ஒற்றைப் பரிமாணவெளியில்)

படம். 1.5-ல் காட்டப்பட்டுள்ள அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலத்தை நாம் எடுத்துக்கொள்வோம்.

$$V = o; \qquad o \le x \le a$$
$$V = V_o; \qquad -b \le x \le o$$

மேலும் நிலையழுத்தம் அலைச்சீர்மை கொண்டிருப்பதால்

$$V(x) = V\ (x+a+b)$$

ஒரு வரிசையில் அடுத்தடுத்து அமைக்கப்பட்டுள்ள செவ்வகவடிவக் கிணறுகளைப் போலத் தோன்றும் அலைச் சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தத்தின் நிலையொப்புமை (a + b) என்ற இடைவெளியில் ஏற்படுகின்றது.

இவ்விரு பகுதிகளில் ஷ்ரோடிங்கர் அலைச் சமன்பாட்டைக் கீழ்வருமாறு குறிப்பிடலாம். $o \le x \le a$ என்ற பகுதியில்

$$d^2\psi_1 / dx^2 + (2m/h^2)E\psi_1 = 0$$

இதை $d^2\psi_1/dx^2 + \alpha^2 \psi_1 = 0$ (இதில $\alpha^2 = 2m/h^2 E$) எனலாம்.

$-b \le x \le o$ என்ற பகுதியில்

$$d^2 \psi_2 / dx^2 + 2m/h^2 (E-V_o) \psi_2 = o$$

இதை $d^2\psi_2 / dx^2 + \beta^2 \psi_2 = 0$ என எழுதலாம். இதில்

$$\beta^2 = 2m/h^2 \quad (V_o - E), \text{ மற்றும் } E < V_o$$

இங்கு எலக்ட்ரானின் மொத்த ஆற்றல் E, V_o என்ற நிலையாற்றலை விடக் குறைவாக உள்ளதாக ஊகிக்கலாம்.

அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப்புலம் என்பதால் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வு ப்ளாக் சார்புகளாக இருக்க வேண்டும் என்று நாம் ஏற்கனவே நிறுவியுள்ள கருத்தை இங்கு எடுத்தாளலாம்.

$$\psi(x) = e^{ikx} u_k(x)$$

எனவே இருவேறுபட்ட புலவெளியில் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாடு, o

$o \leq x \leq a$ என்ற வெளியில்

$$d^2u_1 / dx^2 + 2ik\,(du_1 / dx) + (\alpha^2 - k^2)\, u_1 = o$$

$-b \leq x \leq o$ என்ற வெளியில்

$$d^2u_2 / dx^2 + 2ik\,(du_2 / dx) - (\beta^2 + k^2)\, u_2 = o$$

இதில் $u_1(x)$ மற்றும் $u_2(x)$ இரண்டும் அதற்குரிய வரம்பிற்குட்பட்ட புலவெளியில் $u_k(x)$-ன் மதிப்புகளாகும். $o \leq x \leq a$ என்ற வெளியில் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டின் தீர்வை

$$u_1(x) = A\, e^{i(\alpha-k)x} + B\, e^{-i(\alpha+k)x}$$

என்றும், இதுபோல $-b \leq x \leq o$ என்ற வெளியில்

$$u_2(x) = c\, e^{(\beta-ik)x} + D\, e^{-(\beta+ik)x}$$

என்றும் எழுதலாம். இதில் A, B, C, D என்பன மாறிலிகளாகும். இவற்றின் மதிப்புகளை அலைச்சார்பின் வரம்பு நிபந்தனைகளைக்

கொண்டு அறியலாம். $x = 0$ என்ற இடத்தில் இரு சார்புகளும் ஒத்த மதிப்புடையனவாக இருக்கின்றன. எனவே

$$[u_1(x)]_{x=o} = [u_2(x)]_{x=o}$$

இந்த நிபந்தனை $A + B = C + D$ என்ற தொடர்பைத் தருகின்றது. இடம் சார்ந்து, சார்புகள் தொடர்ச்சியான மதிப்புகளைக் கொண்டு விளங்குகின்றன. எனவே வரம்பு நிலையில் அவற்றின் சரிவும் சமமாக இருக்கும், அதாவது

$$[u_1'(x)]_{x=o} = [u_2'(x)]_{x=o}$$

இந்த நிபந்தனை

$A\, i\, (\alpha\text{-}k) - Bi\, (\alpha+k) = C\, (\beta+ik) - D\, (\beta+ik)$ என்ற தொடர்பைத் தருகின்றது. அமைப்பு அலைச்சீர்மை கொண்டதால்

$$V(x) = V\, (x + a + b)$$

எனவே

$$[u_1(x)]_{x=a} = [u_2(x)]_{x=-b}$$

இந்த நிபந்தனை

$$A\, e^{i(\alpha - k)a} + B\, e^{-i\,(\alpha+k)a} = C\, e^{-(\beta\text{-}ik)b} + D\, e^{(\beta+ik)b}$$

என்ற தொடர்பைத் தருகின்றது.

$$[u_1'(x)]_{x=a} = [u_2'(x)]_{x=-b}$$

இந்த நிபந்தனை,

$$Ai(\alpha\text{-}k)\, e^{i(\alpha\text{-}k)a} - Bi\, (\alpha\text{-}k)\, e^{-i(\alpha\text{-}k)a}$$

$$C\, (\beta+ik)e^{-(\beta+ik)\, b} - D\, (\beta+ik)\, e^{(\beta+ik)\, b}$$

என்ற தொடர்பைத் தருகின்றது. இந்த நான்கு தொடர்புகளையும் தீர்வுக்கு உட்படுத்தி A, B, C, D ஆகிய நான்கு மாறிலிகளின் மதிப்புகளை அறிந்து அதன் மூலம் முழுமையான அலைச்சார்பை நிறுவலாம். ஆனால் அனுமதிக்கப்படும் தீர்வுகளுக்கான ஆற்றல் அல்லது ஆற்றல் நெடுக்கைகளே நமக்கு வேண்டிய பயனுள்ள விவரங்களைத் தரக்கூடியதாக இருக்கின்றது. மேற்குறிப்பிட்ட நான்கு சமன்பாடுகளுக்கும் இணக்கமான தீர்வு, A, B, C, D இவற்றின் குணகங்களினால் ஆன அணிக்கோவையின் மதிப்பு சுழியாக இருக்கும் போது கிடைக்கின்றது. எனவே,

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ e^{i(\alpha-k)} & -i(\alpha+k) & (\beta-ik) & -(\beta+ik) \\ e^{i(\alpha-k)a} & e^{-i(\alpha+k)a} & e^{-(\beta-ik)b} & e^{(\beta+ik)b} \\ i(\alpha-k)e^{i(\alpha-k)a} & -i(\alpha-k)e^{-i(\alpha+k)a} & (\beta-ik)e^{-(\beta-ik)b} & (\beta+ik)e^{(\beta+ik)b} \end{vmatrix} = 0$$

இதன் தீர்வை,

$$\text{Cos}\, k(a+b) = (\beta^2-\alpha^2 / 2\alpha\beta)\ \text{Sin}\, k\beta b\ \text{Sin}\,\alpha a + \text{Cos}\, h\, \beta b\ \text{Cos}\,\alpha a$$

என்று நிறுவலாம். இத் தொடர்பைப் பயன்படுத்தி அனுமதிக்கப்படுகின்ற ஆற்றல் மதிப்புகளை அறிந்து கொள்ளலாம்.

கையாளுவதற்கு இலகுவான ஒரு சமன்பாட்டைப் பெறுவதற்காக, க்ரோனிக் - பென்னி, நிலையழுத்தத் தடுப்பை ஓர் டெல்டா சார்பாகக் (delta function) கொண்டார்கள். அதாவது $b \to 0$ என்றபோது $V_o \to \infty$ என்றாகின்றது. அதனால் இரு அணுக்கள் நெருங்கிவர நிலை மின்புலம் அதிகரித்தாலும் $V_o b$-ன் மதிப்பு கொடுக்கப்பட்ட அமைப்பிற்கு ஒரு மாறிலியாக இருக்கின்றது எனலாம். இச்சூழலில் மேற்கண்ட தீர்வு,

$$\text{Cos}\, ka = (2mV_o / h^2)\ (\beta b / 2\alpha\beta)\ \text{Sin}\,\alpha a + \text{Cos}\,\alpha a$$

ஏனெனில் $\beta^2 = 2m\ (Vo - E) / h^2,\ \alpha^2 = 2mE / h^2$

$V_o \to \infty$ எனில் $\alpha << \beta$, எனவே $\beta^2 - \alpha^2 \to 2mv_o / h^2$

மேலும் $\text{Sin}\, h\ \beta b \to \beta\, b$

$\text{Cos}\, k\ \beta b \to 1$

$(mV_o b / \alpha h^2) \sin \alpha a + \cos \alpha a = \cos ka$

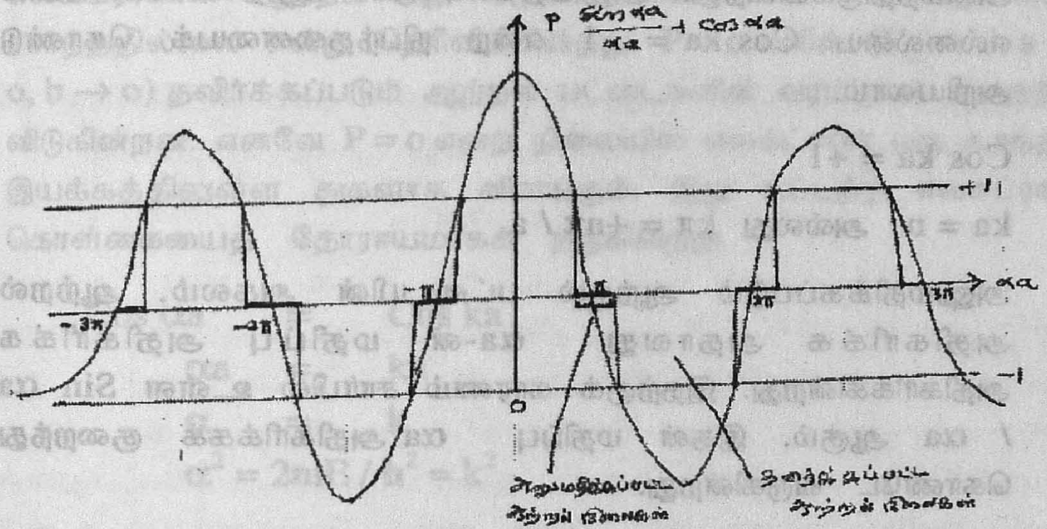
$mV_o ab / h^2 = P$ என்போம். எனவே

$$P. \sin \alpha a / \alpha a + \cos \alpha a = \cos ka \quad (1.6)$$

என்று தோராயமான தீர்வைப் பெறலாம்.

$V_o b$ என்பது மின்னழுத்தத் தடுப்புச்சுவர் உள்ள பகுதியின் பரப்பு என்பதால், P இப்பரப்பை மதிப்பிடும் ஓர் அளவுக்கூறு என்று கூறலாம். P-ன் மதிப்பை படிக அணித்தள அமைப்பைப் பொருத்திருக்கின்றது. அதாவது புலவெளியின் நிலையழுத்தச் சீர்மையைப் பொருத்திருக்கின்றது. V_o, மின்னழுத்தத் தடுப்புச்சுவரின் அகலம் b, ஆற்றல் கேணியின் அகலம் a இவற்றைச் சார்ந்திருக்கின்றது. P-ன் மதிப்பு அதிகமாக இருக்கின்றது என்றால், குறிப்பிட்ட ஓர் எலக்ட்ரான் ஆற்றல் கேணியில் அமிழ்ந்து அடைபட்டுப் போகின்றது என்று பொருள். அதைப்போல $P \rightarrow 0$ எனில், மின்னழுத்தத்தடுப்பு வலுவற்றதாக இருக்கின்றது என்றும், அப்போது எலக்ட்ரான் சிறைப்படுத்தப்படாமல் தன் விருப்பப்படி இயங்கும் தன்மையைக் கூடுதலாகப் பெறுகின்றது என்றும் கூறலாம்.

Cos ka - ன் மதிப்பு -1 லிருந்து +1 வரையிலான மதிப்புகளை மட்டும் பெற்றிருக்க முடியும். இந்த கட்டுப்பாட்டிற்கு உட்பட்ட a-ன் மதிப்புகளே, அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலவெளியில் அனுமதிக்கப்படுகின்ற ஆற்றல் நிலைகளைத் தீர்மானிக்கின்றன. இக்கட்டுப்பாட்டிற்கு உட்படாத a-ன் மதிப்புகள் அனைத்தும் தவிர்க்கப்படும் ஆற்றல் நிலைகளாகும். $P = 3\pi / 2$ என்று எடுத்துக்கொண்டு $P \sin \alpha a / \alpha a + \cos \alpha a$-க்கும் αa-க்கும் ஒரு வரைபடம் படம் 1.6-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



படம்.1.6 $P = 3\alpha \; / 2 \; Sin \; \alpha a / \alpha a + Cos \; \alpha a$-க்கும் αa-க்கும் ஒரு வரைபடம்

$\alpha = 2mE / h^2$ என்பதால், x-ஆயம் ஆற்றல் அளவைக் குறிப்பிடுவதாகக் கொள்ளலாம். அனுமதிக்கப்படுகின்ற ஆற்றல் நிலைகளை, அனுமதிக்கப்படுகின்ற αa-ன் மதிப்புகளால் அறிந்து கொள்ளமுடியும். X-அச்சுக்கு இணையாக, மேலும் கீழும் ஓரலகுத் தொலைவில் இரு இணைகோடுகளை வரையவேண்டும். $P \; Sin \; \alpha a / \alpha a + Cos \; \alpha a$ என்ற சார்பின் வரைகோடு இக்கோடுகளை வெட்டும் புள்ளியிலிருந்து X-அச்சுக்கு நேர்குத்துக்கோடுகளை வரைய, அவைகளுக்குட்பட்ட αa மதிப்புகள் அனுமதிக்கப்படும் மதிப்புகளாகும். பிற மதிப்புகள் தவிர்க்கப்படும் மதிப்புகளாகும். எடுத்துக்காட்டாக $P = 3\pi/2$ என்றும் $\alpha a = \pi /2$ என்றும் கொண்டால் $Cos \; ka = 3$ என்பதால் இது தவிர்க்கப்படும் மதிப்பாகும். $\alpha a = \pi$ எனில் $Cos \; ka = -1$ என்பதால், அது அனுமதிக்கப்படும் மதிப்பாகும்.

படம். 1.6 லிருந்து தீர்வுகளைப் பற்றிய பல முக்கியமான விவரங்களைப் பெறமுடியும்.

1. ஆற்றல் நிறமாலையில் அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் நிலைகள் எண்ணற்ற எண்ணிக்கையில் ஆற்றல் பட்டைகளாக இருக்கின்றன. அனுமதிக்கப்படும் அடுத்தடுத்த இரு ஆற்றல் பட்டைகளுக்கிடையில் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டை

அமைந்திருக்கின்றது. அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் பட்டையின் எல்லையை Cos ka = 1 என்ற நிபந்தனையைக் கொண்டு அறியலாம்.

Cos ka = +1

ka = n அல்லது kπ = +nπ / a

2. அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் பட்டையின் அகலம், ஆற்றல் அதிகரிக்க அதாவது αa-ன் மதிப்பு அதிகரிக்க அதிகரிக்கின்றது. இதற்குக் காரணம் சார்பில் உள்ள Sin αa / αa ஆகும். இதன் மதிப்பு αa அதிகரிக்கக் குறைந்து கொண்டே வருகின்றது.

3. P-ன் மதிப்பு மாறுவதால் ஏற்படும் பாதிப்பைப் பார்ப்போம். P-ன் மதிப்பு மின்னழுத்தத் தடுப்புச் சுவரின் வலிமையைக் குறிப்பிடுகின்றது. P→∞ என்றால் ஆழமான ஆற்றல் கேணியையும், P →o என்றால் மெல்லிய தடுப்புச் சுவரையும் குறிப்பிடுவதாகக் கொள்ளலாம்.

அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் பட்டையின் அகலம், P-ன் மதிப்பு அதிகரிக்க அதாவது எலக்ட்ரானின் பிணைப்பாற்றல் அதிகரிக்கக் குறைகின்றது. P→∞ எனில் அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் பட்டை சுருங்கிவிடுகின்றது. மேலும் k-ன் மதிப்பைச் சார்ந்து தோன்றுவதுமில்லை. ஆற்றல் பட்டைகள் வரிகளாகி விடுகின்றன. P→∞ எனில் P Sin αa / αa + Cos αa என்ற சார்புக்கு Sin αa = o என்ற நிலையில் மட்டுமே தீர்வு கிடைக்கின்றது. எனவே

$$\alpha a = \pm n \pi$$

$$\alpha = \pm n \pi / a$$

$$\alpha^2 = n^2\pi^2 / a^2 = 2mE / h^2$$

அல்லது $E_n = n^2\pi^2h^2 / 2ma^2$ (1.7)

இவை விட்டுவிட்டு இருக்கும் குவாண்டம் ஆற்றல் நிலைகளையும், கட்டுண்ட நிலையில் உள்ள எலக்ட்ரான்களையும் குறிப்பிடுகின்றன. இயல்பாகவே இதை நாம் எதிர்பார்க்க முடியும். ஏனெனில் உயர் P-ன் மதிப்பிற்கு மின்னழுத்தத் தடுப்புச் சுவரை ஊடுருவித் தாண்டுதல் என்பது மேலும் மேலும் கடினமாகி விடுகின்றது. இத்தொடர்பு

எலக்ட்ரானின் ஆற்றலானது அதன் அலைவெக்டர் k மதிப்பைச் சார்ந்ததில்லை என்று தெரிவிக்கின்றது. P = o எனில் ($V_o \rightarrow o$, $a \rightarrow o$, $b \rightarrow o$) தவிர்க்கப்படும் ஆற்றல் பட்டைகளின் வரம்புகள் மறைந்து விடுகின்றன. எனவே P = o என்ற நிலையில் எலக்ட்ரான் ஒரு சுதந்திர இயக்கத்திலுள்ள துகளாக விளங்கும். இது கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையைத் தோராயமாகக் தருகின்றது.

$$\text{Cos } \alpha a = \text{Cos } ka$$

$$\alpha a = ka$$

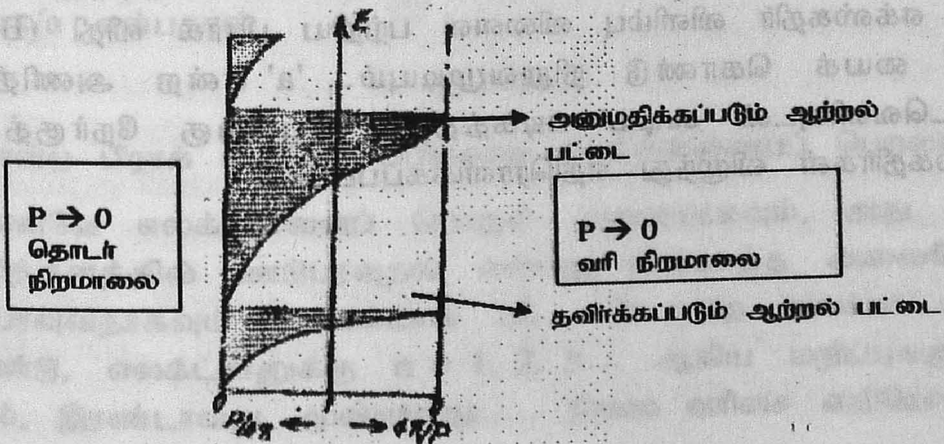
$$\alpha = k$$

$$\alpha^2 = 2mE / h^2 = k^2$$

அல்லது $E = h^2k^2 / 2m = p^2/2m$

இது முழுதும் கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் ஆற்றலுக்கான தொடர்பாகும். எல்லா ஆற்றல் மதிப்புகளையும் அனுமதிப்பதால் இது ஒரு தொடர் நிறமாலையைக் குறிக்கும்.

P-க்கும் E-க்கும் தொடர்புபடுத்தி நாம் ஒரு வரைபடம் ஒன்றைப் பெறமுடியும். $P \rightarrow \infty$ எனில் வரிநிற மாலையும், $P \rightarrow o$ பரவளைய வடிவில் தொடர் நிறமாலையும் ஏற்படுகின்றன. அதாவது P-யின் மதிப்பைச் சுழியிலிருந்து அனந்தம் வரை உயர்த்தும்போது, எலக்ட்ரான் கட்டற்ற நிலையிலிருந்து கட்டுண்ட நிலைக்கு மாற்றம் பெறுகின்றது.



படம். 1.7. P = 4 என்ற போது பல்வேறு ஆற்றல் மட்டங்களில் அனுமதிக்கப்படும் மற்றும் தவிர்க்கப்படும் ஆற்றல் பட்டைகளின் அமைப்பு

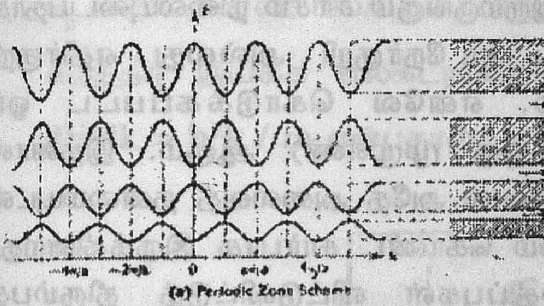
E-க்கும் k-க்கும் உள்ள தொடர்பு - பிரிலோயின் மண்டலம் (Brillouin Zone)

அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் பட்டைகளின் வரப்பை Cos ka= +1 என்ற நிபந்தனை மூலம் பெறலாம் என்று முன்பு பார்த்தோம்.

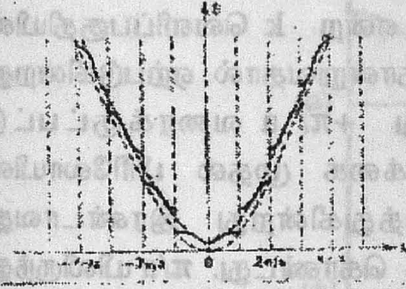
$$k = n\pi/a$$

இதில் n = 1, 2, 3 .... எனவே எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் நெடுக்கையில் ka = +nπ என்ற நிலைகளில் ஒரு தொடர்ச்சியின்மை தோன்றுகின்றது. இதை E-க்கும் k-க்கும் இடையேயான ஒரு வரைபடத்தைக் கொண்டு தெளிவாகப் புலப்படுத்திக் காட்டலாம். படம் 1.8-ல் அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலவெளியிலுள்ள எலக்ட்ரானின் ஆற்றலுக்கும் அதன் அலை வெக்டருக்கும் உள்ள தொடர்பு காட்டப்பட்டுள்ளது.

எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் சுழியிலிருந்து k-ன் மதிப்பு π/a யை எட்டும் வரை அதிகரிக்கின்றது என்பதை அறியலாம். அப்போது அவ்வெலக்ட்ரான் மின்னழுத்தத் தடுப்புச்சுவரில் மோதி எதிரொளிக்கப்படுகின்றது. இது முதல்நிலை வரிசை எதிரொளிப்பு எனப்படும். k-ன் மதிப்பு π/a லிருந்து 2π/a-யை எட்டும் வரை மீண்டும் அதிகரிக்கின்றது. வரம்பு எல்லை மதிப்பில் மீண்டும் மின்னழுத்தத் தடுப்புச் சுவரில் மோதி எதிரொளிக்கப்படுகின்றது. இது இரண்டாம் நிலை வரிசை எதிரொளிப்பு எனப்படும். எதிரொளிப்புகளின் நிலைவரிசை n-ன் மதிப்பைப் பொறுத்தது. இதை நாம் எக்ஸ்கதிர் விளிம்பு விளைவு பற்றிய பிராக் விதி (Bragg law) யைக் கொண்டு நிறுவமுடியும். 'a' என்ற அணித்தள இடைவெளியுடன் கூடிய படிகத்தில் பரப்பிற்கு நேர்குத்தாக எக்ஸ்கதிர்கள் விழுந்து எதிரொளிக்கப்பட்டால்



அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டை
தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் நிலை
அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் நிலை
தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் நிலை
அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் நிலை



h

படம். 1.8. ஆற்றல் பட்டைகளின் அமைப்பு - மண்டலப் பகுப்பாக்கம்.

(பரவளையக்கோடு முழுதும் கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் E-க்கும் k-க்கும் உள்ள தொடர்பாகும்)

$n\lambda = 2a \sin 90^0$

அல்லது $n\lambda = 2a$

$k = n\pi/a$ என்பதால்

$$k = 2\pi/\lambda$$

என்ற பிராக் எதிரொளிப்பிற்கான நிபந்தனையைப் பெறலாம்.

எனவே எலக்ட்ரானைப் பொருள் அலையாகவும், அது படிக அணித்தளத்தில் ஊடுபரவுதல் என்பது மின்காந்த அலைபோல ஊடுபரவுவதாகவும் கொண்டால் $n\lambda = 2a$ என்ற சமன்பாட்டைக் கொண்டு, எலக்ட்ரானுக்கு $n = 1, 2, 3...$ ஆகிய மதிப்புகளுக்கு முதல், இரண்டாவது, மூன்றாவது..... நிலை வரிசை எதிரொளிப்பு உண்டாவதாகக் கூறலாம்.

Cos ka, அனுமதிக்கப்பட்ட ஒவ்வொரு ஆற்றல் மதிப்பு E-க்கும் ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்பைப் பெறுகின்றது. Cos ka என்பது ka-யைப்

பற்றிய அலைச்சீர்மை கொண்ட இருமருங்கும் சரிசம நிலையுடையதாக (even) இருக்கின்றது. அதாவது ka நேர்குறி அல்லது எதிர்குறி மதிப்புடையதாக இருக்கலாம். எனவே கொடுக்கப்பட்ட ஓர் ஆற்றலுக்கு இது $ka + 2\pi n$ (n ஒரு முழுஎண்) ஆகும். இதனால் ஆற்றல் E-ம், அலைவெக்டார் k போல அதே அலைவுத் தன்மையுடன் சரிசமநிலையுடைய அலைச்சீர்மை கொண்ட சார்பாக இருக்கின்றது. அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் மதிப்புகள் விட்டுவிட்டுத் திரும்பத் தோன்றுதல் என்பது $-\pi/a < k < \pi/a$ என்ற k வெளிப்பகுதியின் அலைச்சீர்மையுடன் திரும்பத்திரும்பத் தோன்றுவதால் ஏற்படுகின்றது எனலாம். k வெளியில் $-\pi/a$ லிருந்து $+\pi/a$ வரைக்குட்பட்டு அனுமதிக்கப்பட்ட k மதிப்புகளின் நெடுக்கை முதல் பிரிலோயின் (Brillouin Zone) மண்டலத்தை ஏற்படுத்துகின்றது இரண்டாவது பிரிலோயின் மண்டலம் இரு பகுதிகளைக் கொண்டது. π/a யிலிருந்து $2\pi/a$ வரையில் ஒரு பகுதியும், $-\pi/a$ யிலிருந்து $-2\pi/a$ வரை இரண்டாவது பகுதியும் இருக்கும். அடுத்தடுத்துள்ள இரு பிரிலோயின் மண்டலங்களுக்கு இடையிலுள்ள ஆற்றல் இடைவெளி தவிர்க்கப்பட்ட பகுதியாகும். இப்பிரிலோயின் மண்டலங்களைப் பற்றி பின்னர் விரிவாகப் பார்ப்போம்.

அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையமுத்தப் புலவெளியில் எலக்ட்ரானின் திசைவேகம்

v_g என்ற திசைவேகத்துடன் இயங்கும் எலக்ட்ரானை ஓர் அலைக் கொத்தாகக் (wave packet) கருதலாம். அலைக் கொத்து என்பது அதிர்வெண்ணாலும், அலைநீளத்தாலும் ஒரு குறுகிய எல்லைக்குள் மாறுபட்ட பல அலைகள் மேற்பொருந்தி, ஒரு குறுகிய வெளியில் மட்டும், எப்போதும் அது குறிப்பிடும் எலக்ட்ரானை விட்டுப் பிரியாது தோன்றியிருக்கும். அவ்வெளிக்கு அப்பால் அவ்வலைகள் குறுக்கீட்டுப் விளைவால் ஒன்றையொன்று அழித்துக் கொள்கின்றன.

அலைவேகத்தை ω/k என்பதாலும், அலைக் கொத்தின் வேகத்தை, அதாவது ஒருங்கிணைந்த தொகுப்பு அலைகளின் வேகத்தை $d\omega/dk$ என்பதாலும் குறிப்பிடுவர். எனவே

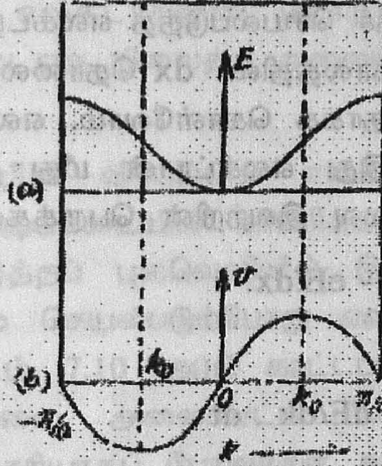
தொகுப்பலை வேகம் $$v_g = d\omega/dk = 2\pi\, d\upsilon/dk \qquad (1.8)$$

$E = h\upsilon$ என்பதால், $dE/d\upsilon = h$, எனவே

$$v_g = 2\pi.\ dE/dk.\ d\upsilon/dE = 2\pi/h\ dE/dk \qquad (1.9)$$

சுதந்திர இயக்க எலக்ட்ரான்களுக்கு $E = h^2k^2 / 2m$

$dE/dk = h^2k / m$ என்பதால் $v_g = h.k/m = p/m$



படம். 1.9 எலக்ட்ரான் ஆற்றல், எலக்ட்ரான் திசைவேகம் - அலைவெக்டார் - வரைபடம்

படம்.1.9(அ)-ல் முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்தில் E-க்கும் k-க்கும் உள்ள தொடர்பு காட்டப்பட்டுள்ளது. படம் 1.9 (M)-ல் அதே பகுதியில் எலக்ட்ரானின் திசைவேகத்திற்கும் k-க்கும் உள்ள தொடர்பு காட்டப்பட்டுள்ளது.

மேற்குறிப்பிட்ட தொடர்புகளிலிருந்து எலக்ட்ரானின் திசைவேகம் E-k வரைகோட்டின் சரிவைப் பொருத்து மாறுபடுகின்றது என்பதைத் தெரிந்து கொள்ள முடிகின்றது. $k = o$ என்ற நிலையிலும் $k = +\pi/a$ என்ற நிலையிலும் சரிவு சுழி என்பதால், முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்தின் அடிநிலையிலும், மேல் நிலையிலும் எலக்ட்ரானின் திசைவேகம் சுழியாக இருக்கும் எனலாம். இவ்விரு வரம்புகளுக்கும் இடைப்பட்ட மையப்பகுதியில், எலக்ட்ரானின் திசைவேகம், சுதந்திர இயக்கத்திற்கு உட்பட்ட எலக்ட்ரானின் திசைவேகத்தை எட்டுகின்றது. ங-ஏ வரை கோட்டில் இது வளைவார மாற்றப்புள்ளி (Inflection point) ஆல் குறிப்பிடப்பட்டுள்ளது. இப்புள்ளிக்குரிய k-ன் மதிப்பு k_o என்றால் k_o மதிப்பிற்கு முன்னால் எலக்ட்ரானின் வேகம் ஆற்றல் அதிகரிக்க அதிகரிக்கின்றது. k_o- மதிப்பிற்கு அப்பால் எலக்ட்ரானின்

வேகம், ஆற்றல் அதிகரிக்கக் குறைகின்றது. இம்முடிவு கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையிலிருந்து முற்றிலும் மாறுபட்டது.

மின்புலப் பாதிப்பு

ஒரு மின்புலம் இதில் ஏற்படுத்தும் பாதிப்பைப் பற்றிப் பார்ப்போம். நு என்ற புறமின்புலத்தைச் செயல்படுத்த எலக்ட்ரானின் திசைவேகம் dv_g அளவு dt என்ற காலத்தில் dx தொலைவு இடம்பெயர்ந்து செல்லும்போது ஏற்படுவதாகக் கொள்வோம். எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் அதிகரிப்பு dE எனில் இது எலக்ட்ரான் மீது செயல்படும் விசை மற்றும் நகர்ந்த தொலைவு இவற்றின் பெருக்கல் பலனாகும்.

$$dE = dE/dk.\ dk = -\ eE.dx.$$

$$= -eEv_g dt$$

$$= -eE/\hbar\ .\ dE/dk\ .\ dt$$

எனவே

$$dk = -eE/\hbar\ .\ dt$$

அல்லது $\hbar\ dk\ /dt = dp/dt = -eE = F$ (விசை), p என்பது அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையமுத்தப்புலவெளியில், புறமின்புலம் செயல்படும்போது எலக்ட்ரானின் உந்தமாகும். சுதந்திரமாக இயங்கும் எலக்ட்ரான் மீது புறவிசையொன்று செயல்படும்போது, அதன் உந்தம் எங்ஙனம் மாறுமோ, அதுபோலவே அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையமுத்தப் புலவெளியில் புறமின்புலம் செயல்படும்போது உந்தம் மாறுகின்றது என்பதை இது தெரிவிக்கின்றது.

இப்போது முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்தில் உள்ள எலக்ட்ரான்களை எடுத்துக்கொண்டு, புறமின் புலத்தால் அதன் இயக்கத்தில் ஏற்படும் பாதிப்பை அறிய முற்படுவோம். புறமின்புலம் செயல்படும்போது, தொடக்கத்தில் எலக்ட்ரான் $k = o$ என்ற நிலையில் இருப்பதாகக் கொள்வோம். செயல்படும் புலத்தால் எலக்ட்ரானின் திசைவேகம் $v_g = 2\pi/h\ (dE/dk)$ என்ற தொடர்பின்படி அதிகரிக்கின்றது. ம-ன் மதிப்பு π/a-ஐ நெருங்க எலக்ட்ரானின் திசைவேகம் குறைந்து $k = \pi/a$ என்றபோது சுழியை எட்டுகின்றது. அதாவது அலைக்கொத்து, பிராக் எதிரொளிப்பிற்கு ஆளாகின்றது. அதாவது எதிர்திசையிலும் இயங்கும் வாய்ப்பைப் பெறுகின்றது. இது $k = -\ \pi/a$ என்ற எல்லை

வரை தொடர்கின்றது. அங்கு மீண்டும் எதிரொளிப்பிற்கு ஆளாகி முன்னோக்குத் திசையில் பயணப்படுகின்றது. எனவே எலக்ட்ரான்மீது ஒரு திசையில் மட்டும் செயல்படும் மின்புலத்தைச் செயல்படுத்த, எலக்ட்ரான் அக்குறிப்பிட்ட பிரிலோயின் மண்டலத்திற்குள் மட்டும் முன்னும் பின்னுமாக இயங்குகின்றது. அதனால் பிரிலோயின் மண்டலத்திற்குள் எலக்ட்ரானின் பொருள் அலை ஊடுபரவும் அலையாக இல்லாது ஒரு நிலைத்த அலையாக (stationary waves) விளங்குகின்றது.

ஆற்றல்பட்டையின் விளிம்பில் எலக்ட்ரானின் இயக்கத்தை கொத்தலையின் அடிப்படையில் விவரிக்கமுடியும். அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையமுத்தப் புலவெளியில் இயங்கும் எலக்ட்ரான்மீது ஒரு புறகாந்தப்புலம் செயல்படும்போது எலக்ட்ரானுக்குப் பதிலான அலை கொத்து படம். 7.10 (அ)ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. செயல்படும் மின்புலம், கொத்தலை, அலைப்பட்டையின் விளிம்பைக் கடந்து செல்வதற்கு மிகச் சரியாகப் போதுமான ஆற்றலை எலக்ட்ரானுக்கு ஊட்டுவதாகக் கொள்வோம்.



அலைக்கொத்து

(அ) (ஆ) (இ)

படம். 1.10. அலைப்பட்டையின் எல்லைக்குள் அலைக்கொத்தின் இயக்கம்.

அலைக்கொத்தில் அதிக மதிப்புடைய k உடன் கூடிய கொத்தலைகள், விளிம்பு விளைவிற்கு உட்படுவதால் அதன் விளைவு படம்.1.10 (ஆ)-ல் காட்டப்பட்டது போல அலைக்கொத்தை உருக்குலைத்து அதற்கோர் எதிர்பங்களிப்பைச் செய்கின்றது. நேர்பங்களிப்பு வலப்புறத்திலும், எதிர்பங்களிப்பு இடப்புறத்திலும்

காட்டப்பட்டுள்ளன. இது எலக்ட்ரான் மட்டுப்படுதலைச் சுட்டிக்காட்டுவதாக இருக்கின்றது. எலக்ட்ரானுக்கு இவ்விரு பங்களிப்புகளும் சமமாக இருக்கும்போது, எலக்ட்ரானின் வேகம் சுழியாகிவிடுகின்றது படம். 1.10(இ)

படம் 1.10(இ) எலக்ட்ரானின் அலைக்கொத்தின் மீது செயல்படும் புறமின்புலத்தின் வரம்பு நிலையைக் குறிப்பிடுகின்றது. உயர் ஆற்றல் பட்டைக்குச் செல்ல போதியளவு கிளர்ச்சி ஆற்றலை ஊட்டாதவரை எலக்ட்ரான் ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் பட்டையின் எல்லைக்குள்ளே சிறைப்பட்டிருக்கும் எனலாம். இந்த விளக்கம், ஆற்றல் பட்டையின் விளிம்போரத்தில் உள்ள உந்த வெளியில் இயங்கும் எலக்ட்ரான்கள் நியூட்டனின் இயக்கச் சமன்பாடுகளுக்கு உட்படுவதில்லை என்ற உண்மையைத் தெரிவிக்கக் கூடியதாக இருக்கின்றது.

ஒரு பிரிலோயின் மண்டலத்தை விட்டு அடுத்துள்ள பிரிலோயின் மண்டலத்திற்கு எலக்ட்ரான் எப்போதாவது செல்லுமா, செல்லாதா என்று கேட்டால், ஒரு நிபந்தனைக்குட்பட்ட எலக்ட்ரான்கள் செல்லுமெனலாம். முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்தில் தொடக்கநிலையில் எலக்ட்ரானின் k மதிப்பு $2\pi/a$-ஐ விடக் குறைவாக இருப்பதால் அங்கு சிறைப்படுத்தப்படுகின்றது.

ஓர் பிரிலோயின் மண்டலத்தில் தங்கியிருக்கின்ற ஓர் எலக்ட்ரான் மீது தொடர்ந்து விசையைச் செயல்படுத்தினாலும் அதாவது ஆற்றலைப் படிப்படியாக உயர்த்தினாலும், அது மற்றொரு மண்டலத்திற்குச் செல்லாது. இதற்குக் காரணம் அடுத்தடுத்த பிரிலோயின் மண்டலங்கள் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளியால் விலகியிருக்கின்றன. இந்த ஆற்றல் இடைவெளிக்குச் சமமான ஆற்றலை ஒரு பிரிலோயின் மண்டலத்திலுள்ள எலக்ட்ரான் ஒரே தவணையில் உட்கிரகிக்காத வரையில் அதனால் அண்டையிலுள்ள பிரிலோயின் மண்டலத்திற்குச் செல்லவே முடியாது.

1.5. இருபரிமாண முப்பரிமாண பிரிலோயின் மண்டலங்கள்

இரு பரிமாண வெளியில் சதுரப்படிக அணித்தளத்தில் k வெக்டார் k_x k_y என இரு கூறுகளைக் கொண்டிருக்கின்றது.

$$k = n_1 k_x + n_2 k_y$$

$$k_x = n_1 \pi/a; \quad k_y = n_2 \pi/a$$

எனவே

$$k = \pi/a\ (n_1^2 + n_2^2)$$

முதல் பிரிலோயின் பரப்பிற்கு அனுமதிக்கப்படும் ம-ன் மதிப்பு சிறுமமாக இருக்க வேண்டும். எனவே n-ல் ஓர் எண்ணின் மதிப்பு 1 ஆகவும் மற்றொன்று சுழியாகவும், இரண்டாவது பிரிலோயின் பரப்பிற்கு இரண்டு எண்களின் மதிப்பும் +1 ஆகவும் இருக்கும் எனலாம்.

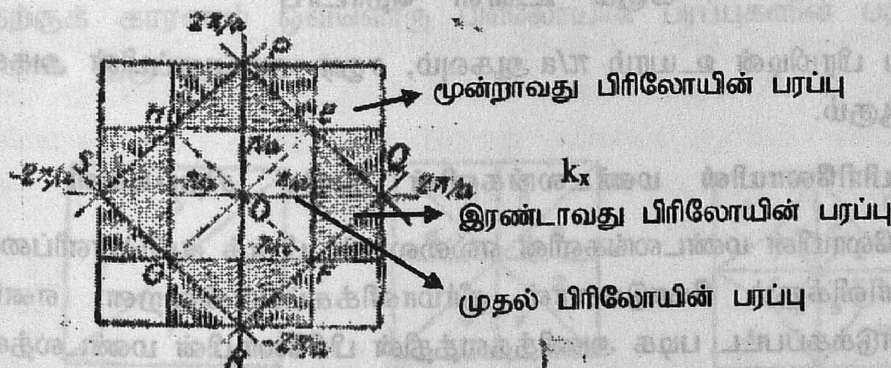
முதல் பிரிலோயின் பரப்பிற்கு $n_1 = +1, n_2 = 0$ குத்துத்தளத்தில்

$n_1 = 0; n_2 = +1$ கிடைத்தளத்தில்

இரண்டாவது பிரிலோயின் பரப்பிற்கு

$$n_1 = n_2 = +1$$

படம் 1.11-ல் இரு பரிமாண சதுர அணித்தளத்தின் பிரிலோயின் பரப்புக்கள் காட்டப்பட்டுள்ளன.



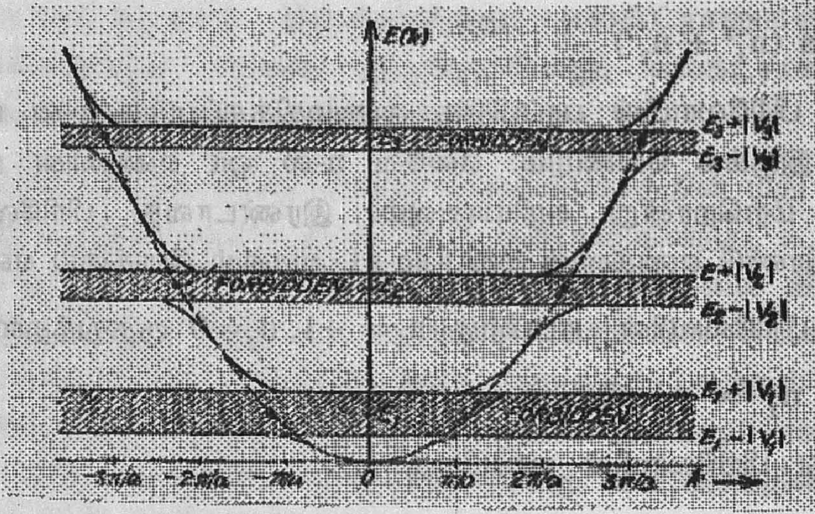
படம். 1.11 இரு பரிமாண சதுர அணித்தளத்தின் பிரிலோயின் பரப்புகள்

முப்பரிமாண கனச்சதுர அணித்தளத்தின் பிரிலோயின் மண்டலங்களை இதுபோலக் கணக்கிடலாம்.

$$k = n_1 k_x + n_2 k_y + n_3 k_z$$

$$= \pi(n_1^2 + n_2^2 + n_3^2) \qquad (1.10)$$

முதல் பிரிலோயின் மண்டலம் $n_1 = n_2 = n_3 = +1$ என்ற நிபந்தனைக்குட்பட்ட பகுதியாகும். இது கனச்சதுர வடிவில் உள்ளது. இரண்டாவது பிரிலோயின் மண்டலம், முதல் மண்டலத்தின் முகப்பரப்புகளில் பிரமிட் வடிவில் அமைந்திருக்கின்றது.



படம். 1.12

எலக்ட்ரான் ஆற்றல் E-க்கும் உந்த செலுத்து வெக்டார் K -க்கும் உள்ள தொடர்பு

இப் பிரமிடின் உயரம் π/a ஆகவும், சதுர அடிப்பரப்பின் அகலம் 2π/a ஆகும்.

பிரிலோயின் மண்டலங்களின் தனிச் சிறப்புகள்

1. பிரிலோயின் மண்டலங்களின் எல்லைகள், பிராக் எதிரொளிப்பைத் தெரிவிக்கும் கோடுகளால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றன. எனவே கொடுக்கப்பட்ட படிக அணித்தளத்தின் பிரிலோயின் மண்டலத்தை நிறுவ படிகத்தளப் புள்ளிகளைக் கொண்டு இருக்ககக்கூடிய அனைத்து எதிரொளிப்புத் தளங்களை உருவாக்க வேண்டும்

2. பிரிலோயின் மண்டலங்களின் எல்லைகள், அமைப்பின் இடவொப்புமைச் சீர்மையை மட்டும் சார்ந்திருக்கின்றது.

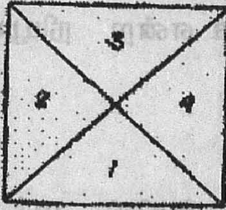
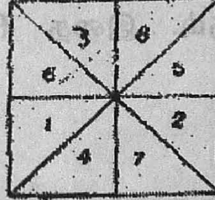
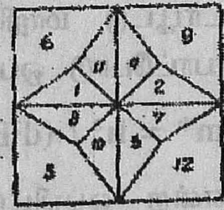
3. ஒரு பிரிலோயின் மண்டலத்தின் கனஅளவு, ஒரு ஆற்றல் பட்டையில் இருக்ககக்கூடிய ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிகையை மதிப்பிடுகின்றது.

4. பிரிலோயின் மண்டலங்களின் கட்டமைப்பில் வடிவியல் மட்டுமே ஈடுபட்டிருக்கின்றது. இச்சீர்மை, படிக அணித் தளச் சீர்மையோடு பெரிதும் தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது.

5. கொடுக்கப்பட்ட படிகத்தின் எல்லா பிரிலோயின் மண்டலங்களும் சமஅளவு பரப்பை / கனஅளவைக் கொண்டிருக்கின்றன.

6. பொதுவாக முதல் பிரிலோயின் மண்டலம் பற்றி அறிந்திருந்தால் பிற பிரிலோயின் மண்டலங்களை இதைக் கொண்டே விவரிக்கமுடியும். இதை மண்டலச் சுருக்கம் (reduction of Zone) என்பர்.

எடுத்துக்காட்டாக இரு பரிமாண வெளியில் நிறுவப்பட்ட பிரிலோயின் பரப்புகளை எடுத்துக்கொள்வோம். படம் 1.13 முதல் பிரிலோயின் பரப்பு சதுரவடிவில், k வெளியில் $4\pi^2/a^2$ என்ற பரப்பளவைக் கொண்டுள்ளது. இரண்டாவது பிரிலோயின் பரப்பு நான்கு துண்டுகளைக் கொண்டுள்ளது. இத்துண்டுகளை ஆய அச்சுகளுக்கு இணையாக $2\pi/a$ தொலைவு இடப்பெயர்வு செய்து முதல் பரப்பின் உட்புறம் அமையுமாறு செய்யலாம். இப்படிச் செய்யும் போது நான்கு துண்டுகளும் மிகச் சரியாக முதல் பரப்பில் பொருந்திவிடுகின்றன. இதற்குக் காரணம் ஒவ்வொரு பிரிலோயின் பரப்புகளின் பரப்பளவு சமமாக இருப்பது தான்.

படம். 1.13 இடப்பெயர்வுற்ற இரண்டாவது(அ) மூன்றாவது (ஆ) நான்காவது பிரிலோயின் பரப்புகள்

1.6. எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறை (Effective mass of the electron)

பொதுவாக ஒரு துகளின் நிறை மாறாது என நாம் நம்பினோம். ஆனால் சார்புக் கொள்கைகள், இது அதன் இயக்க வேகத்திற்கு ஏற்ப அதிகரிக்கின்றது என்று தெரிவித்தன. இதைப்போல எலக்ட்ரான் போன்ற மின்னூட்டத்துகள், அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையமுத்தப்புலவெளியில் புறகாந்த அல்லது மின்புலத்தால் முடுக்கப்பட்டு இயங்கும்போது தன் நிறையை அதிகரித்துக்

கொள்கின்றது. அதிகரித்த வேறுபட்ட இந்த நிறையே செயலுறு நிலை எனப்படுகின்றது.

தொடக்கத்தில் k என்ற அலைவெக்டாருடன் இருக்கும் ஓர் எலக்ட்ரான் மீது E என்ற புறமின்புலத்தைச் செயல்படுத்துவோம். எலக்ட்ரான் பெறும் முடுக்கம் என்பது கொத்தலையின் (Group wave) திசைவேகத்தில் காணப்படும் மாறுபாட்டு வீதமாகும்.

முடுக்கம் $= a = dv_g / dt = dv_g/dk. \, dk/dt$

ஆனால் $v_g = 1/h \;\; dE/dk$ என்றறிவோம். எனவே

$a = 1/h. \, d^2E/dk^2 \, . \, dk/dt$

மேலும் $dk/dt = -eE/h$ என்பதால்

$dv_g/dt = -eE. \, 1/h^2 \;\; d^2E/dk^2$

அல்லது $-eE = h^2/(d^2E/dk^2) \;\; dv_g/dt$

இச்சமன்பாடு எலக்ட்ரான்மீது செயல்படும் விசை eE-க்கும் அதன் முடுக்கம் dv_g/dt-க்கும் உள்ள தொடர்பைக் குறிப்பிடுகின்றது. இதில் $h^2/(d^2E/dk^2)$ என்பது அவ்விரு இயற்பியல் பண்புகளை இணைக்கும் தொடர்பூட்டு மாறிலியாகும். இதை $F = ma$ என்ற நியூட்டனின் சமன்பாட்டோடு ஒப்பிட

$$m^* = h^2 / (d^2E/dk^2) \tag{1.11}$$

என்ற ஒப்பிட்டுச் சமனைப் பெறலாம். இதில் m^* என்பது அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையமுழுத்தப் புலவெளியில் இயங்கும் எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறை எனப்படுகின்றது.

எலக்ட்ரான் இயங்கும் வெளியில் புலம் அலைச்சீர்மையின்றி சீரானதாக இருப்பின் (தனித்தியங்கும் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்) என்றாகும்.

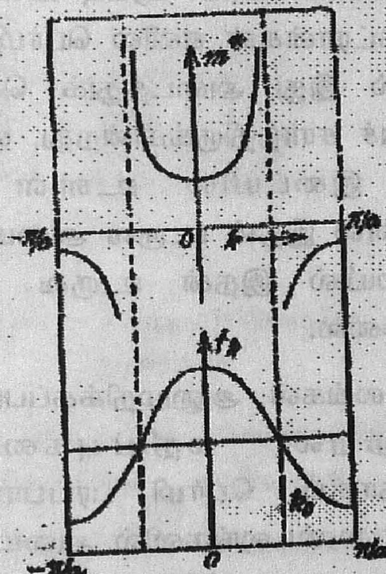
$E = P^2/2m = h^2k^2/2m$

அல்லது $d^2E/dk^2 = h^2/m$

எனவே $m^* = m$

ஆனால் அலைச் சீர்மை கொண்ட புலத்தில் எலக்ட்ரான் இயங்கும்போது, E ஆனது k-ஐச் சார்ந்து மேற் குறிபிட்டது போல மாறுவதில்லை. எனவே $m^* \;\; m$ என்று கொள்ள வேண்டியிருக்கின்றது.

மேலும் m*-ன் மதிப்பில் வேறுபாடு காணப்படுகின்றது. எனவே அலைச் சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலத்தில் எலக்ட்ரானின் இட அமைவிற்கு ஏற்ப வெவ்வேறு செயலுறு நிறையுடன் இயங்குகின்றது என்றும், அதனால் அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலம் எலக்ட்ரானின் இயக்கத்தில் ஏற்படுத்தும் பாதிப்பிற்குப் பதிலாக அதற்குத்தக்கவாறு பெற்றுள்ள செயலுறு நிறையுடன் கூடிய, தன்னிச்சையாக இயங்கவல்ல எலக்ட்ரானாகக் கருதலாம். எனவே கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையின் முடிவுகளில் காணப்படும் முரண்பாடுகளை, அதில் வரும் எலக்ட்ரானின் நிறையை அதன் செயலுறு நிறையாகத் திருத்தம் செய்து கொண்டால், பெரிதும் களைய முடிகின்றது.



படம்.1.14. செயலுறு நிறைக்கும் அலைவெக்டருக்கும் உள்ள வரைபடம்

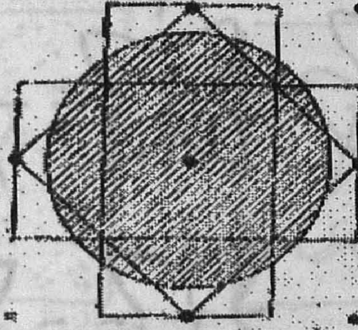
படம்.1.14-ல், எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறை அலைவெக்டரோடு சார்புபடுத்திக் காட்டப்பட்டிருக்கின்றது. k = o என்றிருக்கும்போது போது எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறை அதன் இயல்நிலை நிறைக்குச் சமமாக இருக்கின்றது. k-ன் மதிப்பு அதிகரிக்க, செயலுறு நிறையும் அதிகரிக்கின்றது. இவ்வதிகரிப்பு k-ன் மதிப்பு, k_o என்ற மதிப்பை எட்டும் மட்டும் அதாவது E-k வரைபடத்தில் வளைவார மாற்றப்புள்ளியை அடையும் வரை தொடர்கின்றது. அதன் பிறகு அழு எதிர்குறியுடன் கூடிய செயலறு நிறையைப் பெறுகின்றது. k

அதிகரிக்க m*-ன் மதிப்பு அதிகரிக்கின்றது என்றாலும் $k = \pi/a$ என்ற மதிப்பை எட்டும் வரை எதிர் மதிப்புள்ளதாகவே இருக்கின்றது.

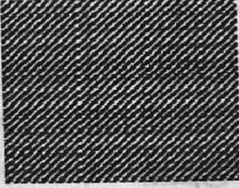
1.7. பெர்மி பரப்புகள் (Fermi surfaces)

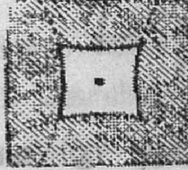
பெர்மி ஆற்றல் என்பது, உலோகங்களில் எலக்ட்ரான்கள் நிறைவுற்ற ஆற்றல் நிலைகளின் உயர்ஆற்றல் மதிப்பு என அறிவோம். பெர்மி ஆற்றலுக்கு இணையான ஆற்றலைப் பிரதிபலிக்கும் அலை வெக்டரின் முனை முப்பரிமாண வெளியில் அதன் செல்வழியால் காட்டும் பரப்பு பெர்மி பரப்பு எனப்படுகின்றது. சார்பிலா சுழிவெப்பநிலையில், நிறைவுற்ற மற்றும் வெற்று இட நிலைகளைப் பிரித்துக் காட்டும் பரப்பாகப் பெர்மி பரப்பு விளங்குகின்றது எனலாம். முழுதும் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் எனில் பெர்மி பரப்பு கோளவடிவில் இருக்கும். ம-வெளியில் இது அடைத்துக் கொண்டிருக்கும் வெளி எலக்ட்ரானின் செறிவைச் சார்ந்திருக்கின்றது. எலக்ட்ரானுக்கும் படிக அணித்தளத்திலும் இடையில் உள்ள இடைவினையைப் பொறுத்ததில்லை. ஆனால் இதன் உருவ அமைப்பு இடைவினையைப் பொறுத்தது. உண்மையில் இதன் உருவ அமைப்பு நிறைவான கோளமாக இருப்பதில்லை.

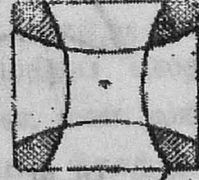
பிரிலோயின் மண்டலங்கள், அனுமதிக்கப்படுகின்ற அலைவெக்டர் k அல்லது ஆற்றல் மதிப்புகளை k-வெளியில் புலப்படுத்திக்காட்டுவதாகும். பெர்மி பரப்பால் கட்டுண்ட வெளி வெவ்வேறு பிரிலோயின் மண்டலங்களில் அமைந்திருக்கும். மண்டலச் சுருக்க முறையில் எப்படி உயர் பிரிலோயின் மண்டலங்களை, முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்திலேயே சுட்டிக் காட்டினோமோ, அதுபோல, பெர்மி பரப்பையும் மண்டலச் சுருக்கமுறையில் முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்தில் சுட்டிக்காட்ட முடியும்.



படம். 1.15 இருபரிமாண வெளியில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களுக்கான பெர்மி பரப்பு



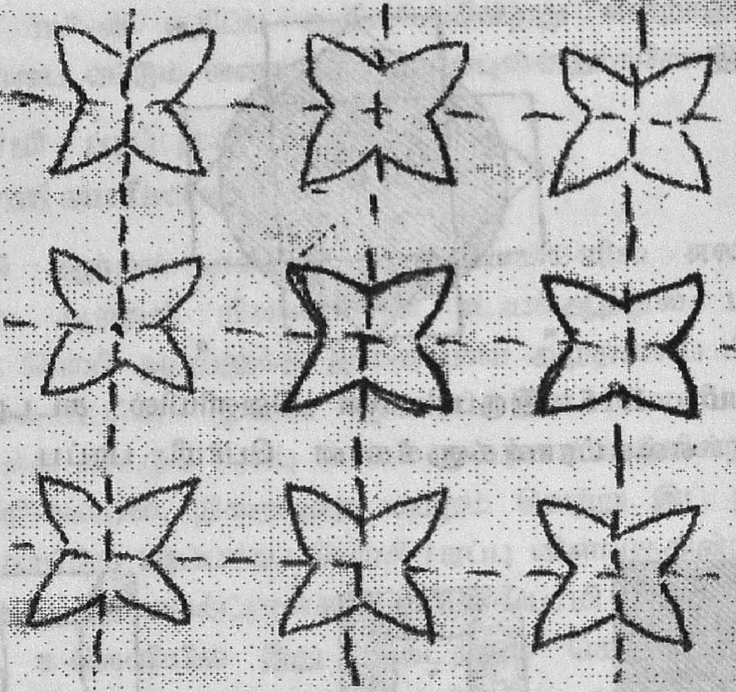




முதல் பிரிலோயின் மண்டலம்   2-வது பிரிலோயின் மண்டலம்   3-வது பிரிலோயின் மண்டலம்

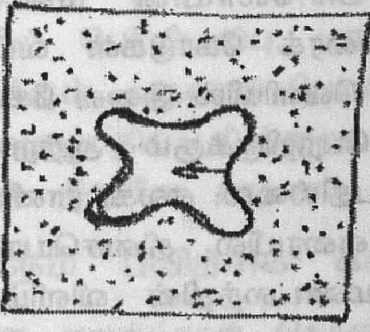
படம். 1.16 கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் பெர்மி பரப்பும் பிரிலோயின் மண்டலச் சுருக்கமும்

மூன்றாவது பிரிலோயின் மண்டலத்தில் உள்ள பெர்மி பரப்பு வெளியை மண்டலச் சுருக்கம் செய்ய, அது ஒரு நாலிதழ் பூ வடிவை (rosette), முதல் மண்டலத்தின் மூலைகளில் ஏற்படுத்துகின்றது. அலைச்சீர்மை கொண்ட பலவெளியில் மூன்றாவது பிரிலோயின் மண்டலத்தில் அமையும் பெர்மி பரப்புகளின் அதே இடவொப்பமைவுடன் காணப்படுவதை படம் 1.17-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

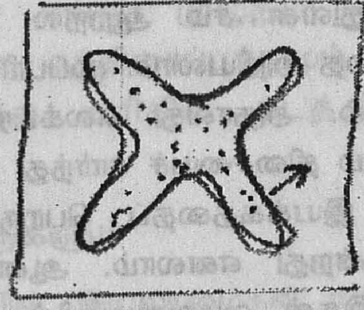


படம் 1.17 நாலிதழ் பூ வடிவ அணி

நாம் இதுவரை முழுதும் கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் பெர்மி பரப்பை மட்டும் கருத்திற் கொண்டோம். ஆனால் முழுதும் கட்டற்ற எலக்ட்ரான் என்பது ஒரு தோராயமே. உண்மையில் எலக்ட்ரான்கள் படிக அணித்தளத்தில் ஏறக்குறைய கட்டற்ற நிலையில் தான் இருக்கின்றது. அதனால் இந்த மண்டலச் சுருக்க முறையில் காட்டப்படும் பெர்மி பரப்பு வடிவங்கள் சிற்றுலைவுடன் காணப்படும். முழுதும் கட்டற்ற எலக்ட்ரான் நிலையிலிருந்து ஏறக்குறைய கட்டற்ற நிலைக்கு ஏற்ப பெர்மி பரப்பை நிறுவ நாம் கீழ்க்கண்ட குறிப்புக்களை நினைவிற் கொள்ளவேண்டும்.



2வது

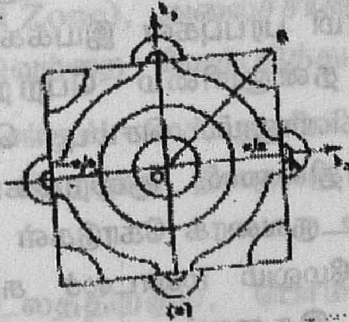


3வது

படம். 1.18 பிரிலோயின் மண்டலச் சுருக்கம் (படிக அணித்தளத்தில்)

1. படிகத்தின் அலைச்சீர்மை கொண்ட மின்னழுத்தப் புலத்துடன் எலக்ட்ரான் ஏற்படுத்திக் கொள்ளும் இடைவினை, மண்டலங்களின் விளிம்புப் பகுதிகளில் ஆற்றல் இடைவெளியைத் தோற்றுவிக்கக் காரணமாக இருக்கின்றது.
2. பெர்மி பரப்புகள் மண்டலங்களின் விளிம்பெல்லைகளை நேர்குத்தாக வெட்டிக் கொள்கின்றன.
3. படிகத்தில் உள்ள அக மின்னழுத்தப்புலம், பெர்மி பரப்புகளின் கூர்முனைகளை மருங்கச் செய்து விடுகின்றது.

இக்குறிப்புக்களை மனதிற் கொண்டு, படிகத் தளத்தின் அலைச் சீர்மை கொண்ட மின்னழுத்தப் புலத்தில், ஒத்த ஆற்றல் நிலைகளை இணைத்து உருவரைக் கோடுகளாக (contour) காட்டலாம். இதுபடம் 1.19-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.



1.19 அலைச்சீர்மை கொண்ட மின்னழுத்தப்புலத்தில் ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகள்

படம்.1.19லிருந்து, முதல் பிரிலோயின் மண்டலத்தில் அமைந்துள்ள சம ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகள் வட்டங்களாக இருப்பதை அறியலாம். முப்பரிமாண வெளியில் இவை கோளவடிவில் இருக்கும். அதாவது எலக்ட்ரான் பெற்றிருக்கும் ஆற்றல், அவை இயங்கும் திசையைச் சார்ந்து இருப்பதில்லை: எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் அதன் இயக்கத்தைப் பொருத்த வரையில் திசையொவ்வியதாக இருக்கின்றது எனலாம். ஆனால் மண்டலத்தின் விளிம்பை எட்ட எட்ட, இதன் வடிவமைப்பில் சீர்குலைவு ஏற்படுகின்றது. ஏனெனில் விளிம்பெல்லையில் $dE/dk=0$ மேலும் மண்டலங்களின் விளிம்பெல்லைகளில் உருவரைக் கோடுகள் முழுமையாகவும் தொடர்ச்சியின்றியும் காணப்படுகின்றன. இதற்குக் காரணம் அவ்வெல்லைகளில் ஆற்றலில் ஒரு தொடர்ச்சி இன்மை காணப்படுவதே ஆகும்.

ஒரு பொருளின் பெர்மி பரப்பு பற்றிய அறிவு, அதன் மின் கடத்து தன்மை பற்றிய விவரங்களைத் தெள்ளத் தெளிவாகத் தெரிவிக்கின்றது. செம்பு, வெள்ளி, அலுமினியம் போன்ற உலோகங்களில் கோளகப் பெர்மி பரப்பு விரிதலுக்குப் போதிய வெளி இருப்பதால் அவை எளிதில் கடத்திகளாக விளங்குகின்றன. ஓரிணை திறன் கொண்ட எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள உலோகங்களில் கடத்தலுக்கு ஒவ்வொரு அணுவும் ஓர் எலக்ட்ரானை மட்டும் நல்குகின்றன. எனவே முதல் மண்டலம் பாதியளவு மட்டும் நிரப்பப்பட்டதாக இருக்கின்றது. அதனால் பெர்மி பரப்பு கோளவடிவமும், அதன் விரிதலுக்குப் போதிய வெளியும் கொண்டு இருக்கின்றது. ஆனால் ஈரிணைதிறன் கொண்ட உலோகங்களில் பெர்மி பரப்பின் ஒரு பகுதி முதல் மண்டலத்திலும், மற்றவை பிற மண்டலங்களிலும் ஆக உள்ளன. ஆற்றல் பட்டைகளின் குறுக்கீடுகளினால் பெர்மி பரப்புகள் இயக்கம் பெறுவதற்கு ஓரளவு கட்டுப்படுத்தப்பட்ட தன்னுரிமை பெற்றிருக்கின்றன. இவை கடத்திகளாக விளங்கினாலும், செம்பு, வெள்ளிபோல எளிதில் கடத்திகளாக இருப்பதில்லை. குறைக்கடத்திகளில், மண்டல விளம்புகளில் ஆற்றல் உருவரைக் கோடுகள் பெரிதும் சீர்குலைவிற்கு ஆளாகியிருக்கின்றன. மேலும் மண்டலச் சுவர்களையும் தொட்டுக் கொண்டிருக்கின்றன. இதனால் தன் விருப்பப்படி இயங்கும் தன்மையை பெர்மி பரப்புகள் இழந்து விடுகின்றன. இதனால்

அப்பொருட்கள் நல்ல கடத்திகளாக இருப்பதில்லை. அரிதில் கடத்திகளில் பெர்மிபரப்பு, மண்டலச் சுவரை முழுதும் தொட்டுக் கொண்டிருக்கும். அதனால் பெர்மி பரப்பு எத்திசைப்பக்கமும் நகர்ந்து செல்ல அனுமதிப்பதில்லை. இவை அரிதில் கடத்திகளாக இருப்பதற்கு இதுவே காரணம்.

வினாக்களும் பயிற்சிக் கணக்குகளும்

1. கட்டற்ற எலக்ட்ரான் கொள்கையின் இயலாமைகள் யாவை?
2. ப்ளாக் தேற்றத்தைக் கூறி, அதற்கான நிருபணத்தைத் தருக.
3. அலைச் சீர்மை கொண்ட நிலை அழுத்தப்புலத்தில் எலக்ட்ரானின் அலைச் சமன்பாட்டின் தீர்வுகள் ப்ளாக் சார்புகளாக உள்ளன எனக் காட்டுக.
4. க்ரோனிக் - பென்னி மாதிரியமைப்பின் அடிப்படையில் திண்மப்பொருளில் உள்ள எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் நிலைகள், ஆற்றல் பட்டைகளாக உள்ளன என்பதைத்தக்க தொடர்புகளை வருவித்து விளக்கிக்கூறு
5. க்ரோனிக் - பென்னியின் ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கையின் அடிப்படையில் ஆற்றலுக்கும், அலைவெக்டருக்கும் உள்ள தொடர்பை விளக்கிக்கூறு.
6. அலைச்சீர்மை கொண்ட நிலையழுத்தப் புலவெளியில் எலக்ட்ரானின் திசைவேகத்திற்கான தொடர்பைப் பெறுக. புறமின்புலம் ஏற்படுத்தும் பாதிப்பை விவரி.
7. ஆற்றல் பட்டைகளுக்கான வரைபட முறைகளைக் கொண்டு எல்லை விரிந்த மண்டலம் (extended Zone), எல்லை சுருங்கிய மண்டலம் (reduced Zone), அலைச்சீர்மை கொண்ட மண்டலம் (Periodic zone) இவற்றை வேறுபடுத்து.
8. ஒரு படிகத்தில் இயங்கும் எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறைக்கான தொடர்பை வருவி. செயலுறு நிறைக்கு இயற்பியல் விளக்கம் தருக.
9. பிரிலோயின் மண்டலத்திற்கும், பெர்மி பரப்பிற்கும் உள்ள வேறுபாடு யாது? ஓர் உலோகத்தின் பெர்மி பரப்பை அறியும் சோதனை முறையை விளக்கு.

10. கோள வடிவ, நீள் கோள வடிவ பெர்மி பரப்புகளிலிருந்து அறியப்படும் உண்மைகள் யாவை?

11. சைக்ளோட்ரான் ஒத்ததிர்வு ஆய்வு முறை எங்ஙனம் பெர்மி பரப்பை அறிய உதவுகின்றது என விவரி.

12. எதிர்குறியுடன் ஆன செயலுறு நிறைக்கான விளக்கம் யாது?

13. ஓர் ஆற்றல் பட்டையில் இருக்கும் ஆற்றல் நிலைகளின் எண்ணிக்கைக்கான தொடர்பை நிறுவு.

14. உலோகங்களில் எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைகளை அறிவதற்கான கட்டற்ற எலக்ட்ரான் தோராயம் பற்றிய கொள்கையை விவரித்து, பிரிலோயின் மண்டலத்தின் விளிம்புகளின் ஆற்றலில் ஒரு குறிப்பிடும் படியான தொடர்ச்சியின்மை ஏற்படுகின்றது என்று காட்டு.

15. ஏறக்குறைய கட்டற்ற எலக்ட்ரான் தோராயத்தின் அடிப்படையில் உலோகங்களில் காணப்படும் ஆற்றல் இடைவெளிக்கான மூலங்களை விளக்கு.

16. நெருக்கப் பிணைப்புத் தோராயத்தை விவரித்து, ஒரு திண்மத்திலுள்ள எலக்ட்ரானில் ஆற்றல் நிலைகளை மதிப்பிடுக. இக்கொள்கையின் முடிவுகளை ஏறக்குறைய கட்டற்ற எலக்ட்ரான் தோராயத்தின் முடிவுகளோடு ஒப்பிடுக.

2. குறைக் கடத்திகள்

ஆற்றல் பட்டையால் மின் கடத்து திறனுக்கு ஏற்பப் பொருட்களை வகைப்படுத்துதல் - சிலிகானின் கட்டமைப்பு - உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி - மின் கடத்துதிறன் - மின்னூர்திகளின் செறிவு பெர்மி ஆற்றல் - நிறைத்தாக்க விதி.

புறவியலான குறைக்கடத்தி n-வகை, λ வகை - மின்னூர்திகளின் செறிவு, பெர்மி ஆற்றல் - அயனியாக்க ஆற்றல் -

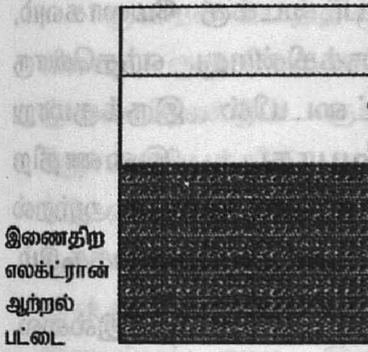
மின்னூட்ட நடுநிலைச் சமன்பாடு - எலக்ட்ரான், மின்துளைச்செறிவு அறிதல் - உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி, புறவியலான குறைக்கடத்தி - குறைக் கடத்திகளில் ஹால் விளைவு

2. குறைக்கடத்திகள்

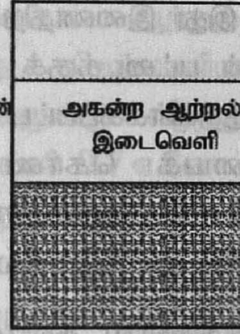
(Semi Conductors)

2.1. எளிதில் கடத்தி, அரிதில் கடத்தி, குறைக்கடத்தி

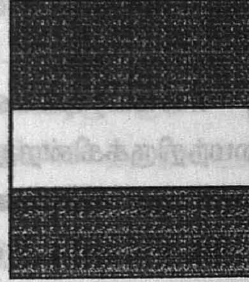
திண்மங்களில் அணுக்கள் நெருக்கமாக அமைந்திருப்பதால், அவை ஒன்றுக்கொன்று இடைவினை புரிகின்றன. இதனால் தனி அணுவில் அனுமதிக்கப்படுகின்ற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் நிலைகள், தன்னுடைய அமைப்பில் மாற்றம் பெறுகின்றன. அதன் விளைவினால் ஆற்றல் பட்டைகள் தோன்றுகின்றன என்றும், அனுமதிக்கப்படுகின்ற அடுத்தடுத்துள்ள இரு ஆற்றல் பட்டைகளுக்கிடையே தவிர்க்கப்படுகின்ற ஆற்றல் பட்டை தோன்றி இருக்கின்றது என்றும் நாம் அறிவோம். ஆற்றல் பட்டைகளின் வடிவமைப்பு, வெவ்வேறு திண்மங்களில் மாறுபட்டிருப்பதுடன், எளிதில் கடத்தி, குறைக் கடத்தி, அரிதில் கடத்தி எனத் தன்மையில் வேறுபட்ட திண்மங்களில் குறிப்பிடும் படியான வேற்றுமையுடன் காணப்படுகின்றது. அதனால் இந்த அடிப்படையில் திண்மங்களை மின் கடத்தும் தன்மையால் மூன்று வகைப்படுத்தலாம். அவை (அ) எளிதில் கடத்தி (ஆ) அரிதில் கடத்தி (இ) குறைக்கடத்தி ஆகும்.



(அ) எளிதில் கடத்தி



(ஆ) அரிதில் கடத்தி



(இ) குறைக்கடத்தி

படம் 2.1. எளிதில் கடத்தி, அரிதில் கடத்தி, குறைக்கடத்திகளில் ஆற்றல் பட்டைகளின் வடிவமைப்பு.

திண்மத்தில் உள்ள அணுவின் அகக்கூட்டில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் இறுக்கமாகப் பிணைவுற்றிருக்கும். ஆனால் புறக்கூட்டில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் அப்படி இருப்பதில்லை. இந்த எலக்ட்ரானுக்கு இணை திற எலக்ட்ரான்கள் என்பர். இந்த எலக்ட்ரானுக்கு அனுமதிக்கப்படுகின்ற ஆற்றல் நிலைகளே இணைதிற எலக்ட்ரான் (Valence band) ஆற்றல் பட்டையாகக் காட்சியளிக்கிறது. உயர் ஆற்றலுடன் எலக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்பட்டுள்ள ஆற்றல் பட்டை என்றும் இதைக் குறிப்பிடலாம். இப்பட்டை எலக்ட்ரான்களால் முழுமையாகவோ அல்லது அரை குறையாகவோ நிரப்பப்பட்டிருக்கலாம்.

இதற்கு அடுத்து அனுமதிக்கப்படுகின்ற ஆற்றல்பட்டை கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டை (Conduction band) எனப்படும். இப்பட்டையில் இடம்பெறும் எலக்ட்ரான்களையே கடத்து எலக்ட்ரான்கள் என்பர். நிரப்பப்படாத தாழ்ந்த ஆற்றல்பட்டையைக் கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டை என்றும் கூறலாம். இவ்விரு பட்டைகளுக்கும் இடையில் ஓர் இடைவெளி இருக்கும். இதைத் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டை (Forbidden

band) என்பர். இது இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டைக்கு மேலாகவும், கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்குக் கீழாகவும் இருக்கின்றது. எந்தவொரு எலக்ட்ரானும் இத்தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையில் இருக்குமாறு ஆற்றல் நிலையைக் கொண்டிருக்க முடியாது. இணைதிற எலக்ட்ரானுக்குப் போதிய ஆற்றலூட்டினால், அது தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையைத் தாண்டி கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்குச் செல்லக்கூடும்.

எளிதில் கடத்திகளில் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டை இல்லை. அதாவது இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையும், கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையும் ஒன்றையொன்று குறுக்கிட்டுக் கொள்கின்றன. அதாவது எளிதில் கடத்திகளில் இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் மிக எளிதாக விடுவித்துக்கொண்டு கடத்து எலக்ட்ரான்களாக மாறிவிடுவதற்கான வாய்ப்பு இயற்கையாகவே அமைந்திருக்கின்றது. எளிதில் கடத்திகளில் இந்த எலக்ட்ரான்கள் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் எனப்படும். அதன் உயரளவு கடத்தும் திறனுக்கு இந்த எலக்ட்ரான்களே காரணம். செம்பு, வெள்ளி, தங்கம், அலுமினியம் போன்ற திண்மங்கள் எளிதில் கடத்திகளுக்கு எடுத்துக்காட்டுகளாகும்.

அரிதில் கடத்திகளில் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டையின் அகலம் அதிகமாக இருக்கின்றது. இதனால் எலக்ட்ரான்கள் மிக எளிதாக இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு எடுத்துச் செல்லப்படுவதில்லை. அரிதில் கடத்திகளில் இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் அனைத்தும் இறுக்கமாக அணுவோடு பிணைவுற்றிருக்கின்றன. மேலும் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் உள்ள ஆற்றல் நிலைகள் எலக்ட்ரான்களால் முழுதுமாக நிரப்பப்பட்டிருக்கின்றன. கண்ணாடி, மைகா, வைரம் போன்ற திண்மங்கள் அரிதில் கடத்திகளுக்கு எடுத்துக்காட்டுகளாம். இவற்றில் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டையின் அகலம் ஏறத்தாழ 10 எலக்ட்ரான் வோல்ட் என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது. இதனால் மின்புலத்தைச் செயல்படுத்துவதாலோ, வெப்பநிலையை அதிகரிப்பதினாலோ மிக எளிதாக இணை திற எலக்ட்ரான்களை, கடத்து எலக்ட்ரான்களாக மாற்ற முடிவதில்லை. உயர்வெப்பநிலைகளில் திண்மத்தின் கட்டமைப்பு சீர்குலைவதால், அதன் கடத்தும் தன்மையில் குறிப்பிடும்படியான மாற்றம் ஏறபடுகின்றது. சிறிதளவு கடத்து எலக்ட்ரான்களை உருவாக்க முடிவதே இதற்குக் காரணமாகும்.

குறைக் கடத்திகளில், தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் அகலம் மிகவும் குறுகியதாக இருக்கின்றது. ஜெர்மானியம், சிலிகான் ஆகிய இவையிரண்டும் குறைக்கடத்திகளுக்கு எடுத்துக் காட்டுகளாகும். ஜெர்மானியத்தில் ஆற்றல் இடைவெளி 0.7 எ.வோ ஆகவும், சிலிகானில் 1.1. எ.வோ ஆகவும் இருக்கின்றது. ஆற்றல் இடைவெளி இப்படிக் குறுகியதாக அமைந்திருப்பதால், குறைக் கடத்திகளின் மின்கடத்துதிறன் எளிதில் மற்றும் அரிதில் கடத்திகளுக்கு இடைப்பட்டதாக இருக்கின்றது.

சார்பிலா சுழிவெப்பநிலையில் கடத்து எலக்ட்ரான்கள் இருப்பதில்லை. இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் உள்ள ஆற்றல் நிலைகள் முழுமையாக நிரபப்பப்பட்டிருக்கும். இந்நியையில் ஒரு குறைக்கடத்தி அரிதில் கடத்தி போல மின்கடத்தலுக்குத் துணை புரிவதில்லை. சிறிதளவு ஆற்றலூட்டினால், இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் மிக எளிதாகக் கடத்து எலக்ட்ரான்களாகி விடுகின்றன.

ஓர் எலக்ட்ரான் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்குத் தாவும்போது, ஒரு சகப்பிணைப்பு (covalent bond) முறிக்கப்படுகின்றது. இதனால் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் ஒரு நேர்மின் அயனி தோன்றுகின்றது. இதை நேர் மின் துளை (hole) என்பர். இந்தத் துளை அருகாமையில் உள்ள இணைதிற எலக்ட்ரானைக் கவர்ந்து நிரப்பிக்கொள்ள விழையும். அதாவது துளை இடம் மாறும். எனவே துளையின் தொடர் இடமாற்றத்தாலும் குறைக் கடத்திகளில் மின்னோட்டம் நிகழும்.

உலோகங்களில் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டை இல்லை என்பதால், அதில் துளை ஏற்படுவதற்கான வாய்ப்பு இல்லை. அதனால் உலோகங்களில் மின்னோட்டம் எலக்ட்ரான்களால் மட்டுமே ஏற்படுவதாகவும், குறைக் கடத்திகளில் எலக்ட்ரான் மற்றும் துளைகளால் ஏற்படுவதாகவும் இருக்கின்றன எனலாம்.

உலோகங்கள், மின்கடத்தாப் பொருட்கள், மற்றும் குறைக் கடத்திகளின் மின்தடைத் திறனாலும் (resistivity) அவற்றை வேறுபடுத்தலாம். குறைக்கடத்திகள் உலோகங்களுக்கும், மின்கடத்தாப் பொருள்களுக்கும் இடைப்பட்ட மின் தடை எண்ணைப் பெற்றிருக்கின்றன. குறைக்கடத்திகளின் செயலாக்கப்பயன் விரிவு, அவற்றின் மின்தடை புறக்காரணிகளால் கட்டுப்படுத்த இயலுவதாக அமைந்திருப்பதில்தான் இருக்கின்றது. எனவே குறைக் கடத்திகளை ஒத்த, மின்தடை கொண்ட

பொருளொன்றை உலோகங்கள் மின்கடத்தாப் பொருட்களின் கலவையினால் உருவாக்க முடிந்தாலும், அதைக் குறைக்கடத்தி போலப் பயன்படுத்த முடியாது.

அறை வெப்பநிலையில் உலோகங்களுக்கு மின் தடை எண் 10^{-5} - 10^{-9} ஓம்-மீ என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது. மின் கடத்தாப் பொருட்களுக்கு இந்நெடுக்கை 10^{5} - 10^{17} ஓம் - மீ என்றிருக்கின்றது. குறைக் கடத்திகளில் இதன் மதிப்பு 10^{-3} - 10^{3} வரையில் உள்ளது.

மின்தடை எண் அடிப்படையில் திண்மங்களை எளிதில் கடத்திகள் என்றும், அரிதில் கடத்திகள் என்றும், குறைக்கடத்திகள் என்றும் பிரித்தல் அவ்வளவு சிறப்புடையதன்று. ஏனெனில் மின்தடை எண் வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாறுபடுகின்றது. அதனால் குறைக்கடத்தியை, அரிதில் கடத்தியாகத் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் மாற்ற முடிகின்றது. சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் அரிதில் கடத்தி போலவும், உயர் வெப்பநிலையில் மிகத்தாழ்ந்த மின் தடை எண்ணைக் கொண்ட பொருளாகவும் குறைக்கடத்திகள் செயல்படுகின்றன. இது அவை எதிர்குறி உடைய வெப்ப மின்தடைக் குணகத்தை (temperature coefficient of resistance) உடையதாக இருக்கின்றன என்று தெரிவிக்கின்றது. அதாவது வெப்பநிலை அதிகரிக்கக் குறைக்கடத்திகளின் மின்தடைத்திறன் குறைகின்றது. அல்லது மின்கடத்து திறன் அதிகரிக்கின்றது. இதை, வெப்பநிலை அதிகரிக்க குறைக்கடத்திகளில் மின்கடத்தலுக்குக் காரணமாகும் துகள்களின் எண்ணிக்கை அதிகரிக்கின்றது என்றும் கூறலாம். எளிதில் கடத்திகளில் இந்நிலை காணப்படுவதில்லை. மாறாக அவற்றின் வெப்பமின்தடைக் குணகம் நேர்குறி மதிப்புடையதாக இருக்கின்றது. அதாவது வெப்பநிலை அதிகரிக்க மின்தடை அதிகரிக்கின்றது.

மின்கடத்தாப் பொருட்கள், குறைக்கடத்திகளைப் போல எதிர்குறி உடைய வெப்ப மின் தடைக்குணகத்தைப் பெற்றிருக்கின்றன என்றாலும் அதன் மதிப்பு, குறைக்கடத்திகளைக் காட்டிலும் பல மடங்கு அளவில் உயர்வாக இருக்கின்றது. இதை மின்கடத்து திறனுக்கான தொடர்பைக் கொண்டும் உறுதி செய்யமுடியும்.

கடத்திகளின் மின்கடத்துதிறன்

$$\sigma = \frac{me^2\ r}{2m}$$

ஆகும். வெப்பநிலை உயரும்போது, கடத்து எலக்ட்ரான்களின் சராசரி மோதலிடைத்தொலைவு குறையும். அதனால் தளர்வு நேரம் τ மதிப்பும் குறையும். எனவே τ மதிப்பு வெப்பநிலை அதிகரிக்கக் குறைகிறது. அதாவது மின்தடைத்திறன் அதிகரிக்கும். இது கடத்திகளின் வெப்பமின்தடைத் திறனின் நேர்குறித் தன்மையைப் புலப்படுத்துகின்றது.

குறைக் கடத்திகளிலும், மின் கடத்தாப் பொருட்களிலும், மின்கடத்துதிறன், அவற்றின் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் இருக்கும். எலக்ட்ரான்களினாலேயே பாதிக்கப்படுகின்றது. தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் கடத்து எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மிகக் குறைவாக இருக்கும். வெப்பநிலை உயரும்போது இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் சில போதுமான அளவு ஆற்றலை உட்கவர்ந்து ஆற்றல் இடைவெளியைத் தாண்டி, கடத்தல் எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையை அடையும். இதனால் கடத்தும் திறன் அதிகரிக்கின்றது. அதாவது மின்தடைத்திறன் குறைகின்றது. இது குறைக்கடத்திகளிலும், மின்கடத்தாப் பொருட்களிலும் வெப்பமின் தடைக்குணகம் எதிர்குறித் தன்மை கொண்டிருப்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.

குறைக் கடத்திகளில் நாம் முன்பு ஜெர்மானியத்தையும், சிலிகானையும் குறிப்பிட்டோம். இவற்றைத் தவிர வேறு பல குறைக் கடத்திகளும் உள்ளன. ஆனால் அவற்றின் ஆற்றல் இடைவெளி 1 எ.வோக்கும் அதிகமாக இருப்பதால் அவற்றின் செயலாக்கப் பயன் ஜெர்மானியம், சிலிகானோடு ஒப்பிட அனுகூலமுள்ளதாக இல்லை. குறைக்கடத்திகளாகப் பயன்படுத்தக்கூடிய தனிமங்கள், தனிம

அட்டவணை, மூலமாக அட்டவணை 2.1ல் காட்டப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 2.1

குறைகடத்திக்கு ஏற்புடைய தனிமங்கள்

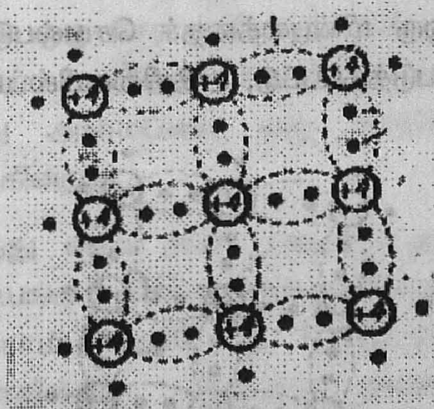
III A	IV A	V A	VI A	VII A
B	C	N	O	F
Al	Si	P	S	Cl
Ga	Ge	As	Se	Br
In	Sn	Sb	Te	I
Tl	Pb	Bi	Po	At

குறைக்கடத்திக்கு ஏற்புடைய தனிமங்கள் அழுத்த எழுத்தில் குறிக்கப்பட்டுள்ளது. இவை வைரம் போன்ற கட்டமைப்பைப் பெற்றிருக்கின்றன. பழுப்பு நிற டின் (gray tin) வைரம், குறைக்கடத்திகளாகச் செயல்படுகின்றன. சில உலோக ஆக்ஸைடுகள், (எ.கா U_2O, BaO), கார்பைடுகள், (எ.கா SiC), நைட்ரைடுகள், சல்பைடுகள் (எ.கா Pbs) கோருண்டம் (Corundum - Al_2O_3) போன்றவைகளும் அத்தகைய கட்டமைப்பின் காரணமாக குறைக்கடத்திகளாகவும், மின்கடத்தாப் பொருளாகவும் செயல்படுகின்றன. பொதுவாகத் தவிர்க்கப்படட ஆற்றல் பட்டையின் அகலம் 2 எ.வோ க்கும் குறைவாக இருப்பின், அப்பொருள் குறைக்கடத்தியாகச் செயல்பட அனுகூலமானது எனலாம். காலியம் ஆர்செனைடு (Gallium Arsenide) என்ற வேதிப்பொருளுக்கு ஆற்றல் இடைவெளி 1.5 எ.வோ, இண்டியம் ஆண்டிமொனைடு (Indium antimonide) க்கு இதன் மதிப்பு 0.2 எ.வோ. கோருண்டம், வைரம், போரான் நைட்ரைடு, சிலிகான் கார்பைடு ஆகிய பொருட்களின் ஆற்றல் இடைவெளி முறையே 4 எ.வோ, 5 எ.வோ, 4.5 எ.வோ 3 எ.வோ ஆகும். இருப்பினும் நமக்குக் கிடைத்திருக்கக்கூடிய பல குறைக்கடத்திப் பொருட்களில் ஜெர்மானியமும், சிலிகானும் பெரிதும் அனுகூலமிக்கவைகளாக இருக்கின்றன. இதற்குக் காரணம் அவற்றின் அனுகூலமான ஆற்றல் இடைவெளியும், வேற்றுப் பொருள் கலப்பிற்கு ஏற்புடைமையும் நிலைப்புத்தன்மையும் தான்.

2.2 சிலிகான், ஜெர்மானியம் ஆகியவற்றில் வேதிப் பிணைப்புகள்

சிலிகானும், ஜெர்மானியமும் தனிம அட்டவணையில் நான்காவது

குத்துவரிசையைச் சேர்ந்திருக்கின்றன. இவை வைரத்தை ஒத்த படிகக் கட்டமைப்பைப் பெற்றிருக்கின்றன. சிலிகானில் 14 எலக்ட்ரான்கள் $1s_2$, $2s_2$ $2p_6$, $3s_2$ $3p_2$ என்றவாறு கூடுகளில் பகிர்வு செய்யப்பட்டும், ஜெர்மானியத்தில் 32 எலக்ட்ரான்கள் $1s_2$, $2s_2$ $2p_6$, $3s_2$ $3p_6$ $3d_{10}$, $4s_2$ $4p_2$ என்றவாறு கூடுகளில் பகிர்வு செய்யப்பட்டும் உள்ளன. இவையிரண்டும் தங்களுடைய புறக்கூட்டில் 4 எலக்ட்ரான்களைப் பெற்றுள்ளன. இவை அகக் கூடுகளில் உள்ள எலக்ட்ரான்களைப் போலன்றி, மிக மென்மையாக அணுக்கருவோடு கட்டுண்டிருக்கின்றன. இவற்றை இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் என்பர். இவை வேறு அணுவில் உள்ள இணைதிற எலக்ட்ரான்களோடு இடைவினை புரிந்து பிணைப்பை ஏற்படுத்திக் கொள்கின்றன. எல்லா அணுக்களும் ஒத்தவை என்பதால் சகப்பிணைப்பே மேலோங்கி விளைகின்றது. இதன்மூலம் இணைதிற எலக்ட்ரான்களுக்கான ஆற்றல்நிலைகளை எலக்ட்ரான்களால் நிறைவு செய்து கொள்கின்றன. இவ்வழிமுறையில் ஓர் அணு வேறு நான்கு அணுக்களால் சூழப் பெற்றிருக்கும். இந்த நான்கு அணுக்களும் ஓர் ஒழுங்கான நான்முகப் படிகக் கட்டமைப்புடன் (tetrahedron) கூடிய படிகத்தின் மூலஅலகின் நான்கு மூலைகளில் அமையும். முப்பரிமாண அணிக்கோவையில், சகப்பிணைப்புகளுக்கிடையே ஏறத்தாழ 109 டிகிரி கோணம் இருக்கும். இது CH_4 மூலக்கூறில் உள்ள பிணைப்பின் அமைப்பையொத்தது.



+4 - ஜெர்மானிய சிலிகான் அணு

- எலக்ட்ரான்

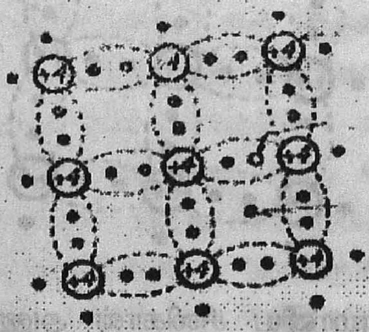
.. - சகப்பிணைப்பு

படம் 2.2 படிகக்கட்டமைப்பில் சகப்பிணைப்பு - ஓர்

இருபரிமாணத் தோற்றம்

குறைக்கடத்தி அணுவின் இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் சகப்பிணைப்பில் ஈடுபடுவதால், அவை படிகத்தில் ஓரிடத்தில் நிலைப்படுத்தப்படுகின்றன. அதனால் கட்டற்ற கடத்து எலக்ட்ரான்கள் தோற்றுவதற்கு வாய்ப்பு இல்லை. தூய சிலிகான், தூய ஜெர்மானியம் படிகங்களில் தனிச்சுழி வெப்பநிலையில் எல்லா இணைதிற எலக்ட்ரான்களும் சகப்பிணைப்பாக்கங்களில் பங்கேற்றிருக்கும். கட்டற்ற கடத்து எலக்ட்ரான்கள் தோன்றி இருக்காது. அதாவது தன்னிச்சையாக நகரக்கூடிய எலக்ட்ரான்கள் இவ்வமைப்புகளில் 0^0K வெப்பநிலையில் இல்லை என்பதால், அவ்வெப்பநிலையில் குறைக்கடத்திகள், மின்கடத்தாப் பொருள் போலச் செயல்படுகின்றன.

இப்போது குறைக்கடத்தியின் வெப்பநிலையைச் சிறிது உயர்த்தினால், அணிக்கோவையில் உள்ள அணுக்களின் அதிர்வுகள் விரிவுற்று, அதிர்வாற்றல் அதிகரிக்கும். இதிலிருந்து சில இணைதிற எலக்ட்ரான்கள், தாம் ஏற்படுத்திக் கொண்ட சகப்பிணைப்பிலிருந்து விடுபடப் போதிய ஆற்றலை உட்கவரும் வாய்ப்பு உள்ளது. அப்போது சில சகப்பிணைப்புகள் முறிந்து தன்னிச்சையாக இயங்கவல்ல கடத்து எலக்ட்ரான்கள் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. இவை எல்லாத் திசைகளிலும் இயங்குவதற்குச் சமவாய்ப்புப் பெற்றிருப்பதால், ஒரு குறிப்பிட்ட திசையில் அவற்றின் இடப்பெயர்ச்சியால் ஏற்படும் மின்னோட்டம் சுழியாகவே இருக்கும். ஆனால் ஒரு மின்புலத்தைச் செயல்படுத்தினால், அவற்றின் இயக்கம் ஒரு திசைப்படுத்தப்பட்டு, அத்திசையில் மின்னோட்டம் ஏற்படும்.



படம் 2.3 சகப்பிணைப்பின் முறிவால் ஏற்படும் கடத்து எலக்ட்ரானும், துளையும்.

சகப்பிணைப்பொன்று முறிந்து கடத்து எலக்ட்ரான் உருவாகும்

போது அவ்விடத்தில் எலக்ட்ரான் நீங்கப்பெற்ற ஒரு காலியிடமும் தோன்றுகின்றது. இக்காலியிடம் நிலையானதில்லை. சகப்பிணைப்பைப் பூர்த்தி செய்து கொள்ளும் முகமாக, அண்டையில் உள்ள ஒரு சகப் பிணைப்பிலிருந்து ஓர் எலக்ட்ரானைக் கவர்ந்து கொள்கின்றது. இக்கவர்ச்சி ஒரு நீண்ட தொடராக இருக்கின்றது. அதாவது காலி இடமும் இடம் பெயர்ந்து மின்னோட்டத்திற்குக் காரணமாகின்றது. இக்காலி இடத்தைத் துளை (hole) என்பர். எலக்ட்ரான்களைப் போல இவையும் எல்லாத் திசைகளிலும் இயங்கிச் செல்வதற்குச் சமவாய்ப்புப் பெற்றிருப்பதால், ஒரு குறிப்பிட்ட திசையில் துளையின் இடப்பெயர்ச்சியால் விளையும் மின்னோட்டம் சுழியாகவே இருக்கும். ஆனால் ஒரு மின்புலம் செயல்படும் போது, மின்புலத் திசைக்கு எதிர்திசையில் எலக்ட்ரான்களும், புலத்திசையில் மின்துளைகளும் நகரும். எனவே குறைக்கடத்திகளில் மின்னோட்டம், கடத்து எலக்ட்ரான்களினாலும், மின்துளைகளினாலும் ஏற்படுகின்றது எனக் கூறலாம்.

உள்ளார்ந்த (intrinsic) குறைக்கடத்திகளில் ஒவ்வொரு கடத்து எலக்ட்ரானும் ஒரு மின்துளையை உருவாக்குவதால் அவையிரண்டின் எண்ணிக்கையும் சம அளவிலே இருக்கும். வெப்பநிலை உயர உயர அதிக அளவில் சகப்பிணைப்புகள் முறிவுறுவதால், கூடுதல் எண்ணிக்கையில் எலக்ட்ரான்களும், மின்துளைகளும் இருக்கும்.

ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் அமைப்பிலுள்ள எல்லா சகப்பிணைப்புகளும் ஒரு சேர முறிவுபடுவதில்லை. இதற்குக் காரணம் வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப முறிவும், மீண்டும் ஒன்றிணைதலும் (recombination) நிகழ்ந்து அமைப்பை ஒரு சமநிலையில் இருக்குமாறு கட்டுப்படுத்தி விடுகின்றது.

கட்டற்ற கடத்து எலக்ட்ரான் குறைக்கடத்தியின் படிகத்தளத்தில் தன்னிச்சையாக இயங்கிக் கொண்டிருக்கும்போது, ஒரு மின் துளையைச் சந்திக்க நேரிடலாம். அப்போது எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் ஒன்றிணைந்து போகின்றன. இதனால் அமைப்பில் மின்துகள்களின் எண்ணிக்கை அல்லது செறிவு குறைந்து போகின்றது. எனவே ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில், சகப்பிணைப்பு முறிவால் உண்டாகும் எலக்ட்ரான்-மின்துளையின் செறிவு, அவற்றின் உற்பத்திக் காரணமான சகப்பிணைப்பின் முறிவு நிகழும் வீதமும், அவற்றின் இணைப்பிற்குக் காரணமான ஒன்றிணைதல் நிகழும் வீதமும் சமமாக இருக்கும்வரை அதிகரிக்கின்றது என்று கூறலாம். இதை

சகப்பிணைப்புமுறிவு

கட்டுண்ட எலக்ட்ரான் ⇄ கடத்து எலக்ட்ரான்+மின்துளை

ஒன்றிணைதல்

என்ற சமநிலையால் குறிப்பிடலாம்.

2.3 உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்திகளில் மின்னூர்திகளின் நகர்திறனும் மின்கடத்து திறனும்

(Mobility of charge carriers and conductivity of Intrinsic semi-conductor)

வெப்பக்கிளர்ச்சி மற்றும் அணித்தள அதிர்வுகளின் காரணமாகக் குறைக்கடத்தியிலுள்ள சில சகப்பிணைப்புக்கள் முறிவுற்றுச் சுதந்திர இயக்கங் கொண்ட எலக்ட்ரான்களையும், நேர்மின் துளைகளையும் தருகின்றன. குறைக்கடத்தியில் ஒரு மின்புலத்தைச் செயல்படுத்த அதிலுள்ள மின்னூர்திகள் என என்ற நகர்வுத் திசைவேகத்தைப் (drift velocity) பெறுகின்றன. இது செயல்படும் மின்புலச் செறிவைப் பொருத்தது. இதன் மதிப்பு வெவ்வேறு குறைக்கடத்திகளுக்கு வெவ்வேறாக இருப்பதுடன், வெவ்வேறு மின்னூர்திகளுக்கும் வெவ்வேறாக இருக்கின்றது.

$v_d \alpha E = \mu E$

இதில் μ என்பது மின்னூர்தியின் நகர்திறனாகும். ஓரலகுப் புலச் செறிவுடன் மின்புலம் செயல்பட, மின்னூர்தி பெறும் இயக்கத் திசைவேகத்தின் மதிப்பே நகர்திறனாக வரையறுக்கப்படுகின்றது.

தூயகுறைக்கடத்தியில், மின்புலம் செயல்படும்போது ஏறக்குறைய வெற்று இடம்போல இருக்கும் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களும், ஏறக்குறைய முழுதும் நிரப்பப்பட்டுள்ள இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் மின்துளைகளும் இயங்குகின்றன. எனவே அவற்றின் இயக்கங்களுக்கான சூழ்நிலை ஒன்றுக்கொன்று மாறுபட்டிருக்கின்றது. அதனால் அவற்றின் நிறை, நகர்திறன் போன்ற இயற்பியல் பண்புகளும் வேறுபட்டிருக்கின்றன. ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் எலக்ட்ரானின் நகர்திறன், மின்துளையின் நகர்திறனை விடக் கூடுதலாக இருக்கின்றது.

கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள எதிர்மின்னூட்டக்கொண்ட கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் செறிவு n_n என்போம். எனவே ஓரலகு பருமனில் மின் கடத்தலுக்கு இருக்கக்கூடிய மின்னேற்றம் $n_n e$ ஆகும். எலக்ட்ரானின் நகர்வுத் திசைவேகம் v_{dn} எனில், மின்னோட்டச் செறிவு,

$$J_n = n_n e \ v_{dn}$$

இது ஓரலகு குறுக்குப் பரப்பின் வழியாக ஒரு வினாடி நேரத்தில் கடக்கும் மின்னேற்றத்தின் மதிப்பாகும். v_{dn}-ன் மதிப்பை இதில் பதிலீடு செய்ய $J = \mu_n n_n eE$ என்ற தொடர்பைப் பெறலாம். σ_n என்பது கடத்து எலக்ட்ரான்களால் விளையும் மின்கடத்து திறன் எனில்,

$$J_n = \sigma_n E \quad (2.1)$$

இவ்விரு தொடர்புகளையும் ஒப்பிட

$$\sigma_n = \mu_n n_n e$$

இதே போன்று, இணைதிற எலக்ட்ரான், ஆற்றல் பட்டையில் உள்ள மின்துளைகளால் விளையும் மின்கடத்து திறனையும் நிறுவலாம். அதை σp என்று குறிப்பிட்டால்

$$\sigma_p = \mu_p n_p e \quad (2.2)$$

இதில் n_p என்பது மின்துளையின் செறிவு, μ_p அதன் நகர்திறனாகும்.

குறைக்கடத்தியின் மொத்த மின்கடத்துதிறன் σ என்பது இவ்விரு மின்னூர்திகளாலான மின்கடத்துதிறனின் கூடுதலாகும்.

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

$$= e\,[n_n \mu_n + n_p \mu_p] \quad (2.3)$$

தூய உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்திகளில், கடத்து எலக்ட்ரானின் செறிவும், மின்துளையின் செறிவும் சமமாக இருக்கும். ஏனெனில் ஒரு சகப்பிணைப்பின் முறிவில் ஒரு கடத்து எலக்ட்ரானும். ஒரு மின்துளையும் தோன்றுகின்றன. எனவே,

$n_n = n_p = n_i$, என்றும்

$\sigma = en_i \ [\mu_n + \mu_p]$, என்றும்

குறிப்பிடலாம். இதில் n_i என்பது குறைக்கடத்தியின் ஓரலகு

பருமனில் உள்ள கடத்து எலக்ட்ரான்கள் அல்லது மின்துளைகளின் எண்ணிக்கையாகும்.

பெர்மி-டிராக் கொள்கைப்படி E, E+dE என்ற ஆற்றல் நெடுக்கையில் உள்ள ஆற்றல் நிலைகளில் எலக்ட்ரான் இருப்பதற்கான வாய்ப்பு பெர்மி சார்பாகும்.

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_BT} + 1}$$

E, E+dE என்ற ஆற்றல் நெடுக்கையில் ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி D(E)dE எனில், ஒரு வரம்பிற்குட்பட்ட ஆற்றல் நெடுக்கையில் இருக்கும் மொத்த எலக்ட்ரான்களை

$$n_i = \int D(E)\, f(E)\, dE$$

ஆற்றல் பட்டையின் தாழ்ந்த மற்றும் உயர் ஆற்றல் நிலைகளின் ஆற்றல் மதிப்புகளே இத்தொகையாக்கத்தின் வரம்புகளாகும். ஆற்றல் நிலை அடர்த்திக்கான தொடர்பின்படி

$$D(E)dE = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2}\, E^{1/2}\, dE$$

$$= CE^{1/2}\, dE$$ என்பதாகும்.

இதில்

$$C = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2}$$

என்ற சமன்பாட்டின்படி அமையும்.

2.4 உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் மின்னூர்திகளின் செறிவு (Carrier concentration in Intrinsic semiconductor)

தனிச்சுழி வெப்பநிலையில், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டை முழுதும் நிறைவுற்றும், கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டை முற்றும்

வெறுமையாகவும் இருக்கும் என்றும், இவ்விரு ஆற்றல் பட்டைகளுக்கு இடைப்பட்ட இடைவெளி, தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டை என்றும், அதன் அகலத்தை E_g என்று ஆற்றலால் குறிப்பிடலாம் என்றும் நாம் அறிவோம். வெப்பநிலை உயரும்போது கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களும், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் மின் துளைகளும் தோன்றுகின்றன.

இனி T என்ற ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் ஒரு குறைக்கடத்தியில் ஓரலகு பருமனில் இருக்கக்கூடிய கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையையும், மின்துளைகளின் எண்ணிக்கையையும் கணக்கிட்டறியலாம். இதற்காக முதலில் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில், எலக்ட்ரான் m_e^* என்ற செயலுறு நிறை கொண்ட ஒரு கட்டற்ற எலக்ட்ரானாகச் செயல்படுகின்றது என்றும், அதுபோல இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் மேற்பகுதிகளில் மின்துளை m_h^* என்ற செயலுறு நிறை கொண்ட மின்னூர்தியாக விளங்குகின்றது என்றும் அனுமானிப்போம். மின்னூர்திகளின் செறிவை இருவேறு வழிமுறைகளினால் தீர்மானிக்கமுடியும். முதலில் ஒரு தோராயமான வழிமுறையாலும், பின்னர் ஒரு துல்லியமான வழிமுறையாலும் எலக்ட்ரான், மின்துளைகளின் செறிவை மதிப்பிட்டறிவோம்.

தோராய முறை

இவ்வழிமுறையில் கடத்து எலக்ட்ரான் மற்றும் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைகள் மிகவும் குறுகியதாக இருப்பதாகக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. அதாவது இவ்வாற்றல் பட்டைகளின் அகலம், தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் அகலத்தைவிட அதாவது E_g ஐ விடக் குறைவாக இருக்கின்றது என்று அனுமானிக்கப்பட்டுள்ளது. ஆதனால் கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள எல்லாக் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களும் E_c என்ற ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலை மட்டுமே பெற்றிருக்கின்றன என்றும், அதுபோல இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் எல்லா மின் துளைகளும் E_v என்ற ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றலைப் பெற்றிருக்கின்றன என்றும் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. அதாவது இத்தோராய முறையில் ஆற்றல்பட்டை ஒரு தனி ஆற்றல் நிலையாகக் கருதப்பட்டுள்ளது எனலாம். இந்த ஊகம் ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கைக்கு எதிரானது.

ஒவ்வொரு ஆற்றல் பட்டையும் D எண்ணிக்கையில் ஓரலகுப் பருமனில் அனுமதிக்கப்படுகின்ற ஆற்றல் நிலைகளைக் கொண்டிருப்பதாகக் கொள்வோம். T என்ற சார்பிலா வெப்பநிலையில் ஓரலகு பருமனில் உள்ள கடத்து எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை

$$n_c = \frac{D}{e^{(E_c - E_F)/k_B T} + 1}$$

என்பதாகும்.

இது கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையில் எலக்ட்ரான்களின் செறிவாகும். இதுபோல இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் மின்துளைகளின் செறிவு

$$n_v = \frac{D}{e^{(E_v - E_F)/k_B T} + 1}$$

என்பதாகும்.

அமைப்பில் ஓரலகுப் பருமனிலுள்ள மொத்த மின்னூர்திகளின் எண்ணிக்கை Dக்குச் சமமாக இருக்கவேண்டும். ஏனெனில் சுழிவெப்பநிலையில் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள அனைத்து ஆற்றல் நிலைகளும் நிறைவுற்றிருக்கின்றன. மேலும் பிணைவுற்ற இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் கருத்திற் கொள்ளப்படவில்லை. ஆற்றல் இடைவெளி அதிகமாக இருக்கும்போது, கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் இருக்கும் எலக்ட்ரான்கள் யாவும், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து வந்திருக்க வேண்டும். எனவே

$$n_c + n_v = D$$

$$= \frac{D}{e^{(E_c - E_F)/k_B T} + 1} + \frac{D}{e^{(E_v - E_F)/k_B T} + 1} = D$$

அல்லது

$$[1 + e^{(E_c - E_F)/k_B T} +] + [1 + e^{(E_v - E_F)/k_B T}]$$

$$= [1 + e^{(E_c - E_F)/k_B T} +] [1 + e^{(E_v - E_F)/k_B T}]$$

e -ன் அடுக்கை இரண்டாம் உறுப்புவரை விரித்துக் கொண்டால்

$$1 + 1 + \frac{E_c - E_F}{k_B T} + 1 + 1 + \frac{E_v - E_F}{k_B T} = \left(2 + \frac{E_c - E_F}{k_B T}\right)\left(2 + \frac{E_v - E_F}{k_B T}\right)$$

இது உண்மையாக இருக்கவேண்டுமெனில், இருக்கவேண்டிய நிபந்தனை

$$E_c + E_v = 2E_F = 0$$

அல்லது

$$EF = (E_c + E_v)/ 2 \quad (2.4)$$

அதாவது பெர்மி ஆற்றல் நிலையானது, கடத்து எலக்ட்ரான் மற்றும் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைகளுக்கு மிகச்சரியாக நடுவில் இருக்கின்றது. மேலும் இதன் அமைவுநிலை, வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதில்லை.

E_c-E_F -ன் மதிப்பு ஒருசில k_BT-ன் மதிப்பைக் காட்டிலும் அதிகமாக இருப்பின், n_c தொடர்பில் வரும் பின்னத்தின் கீழ்ப்பகுதியில் உள்ள 1ஐ, e-அடுக்கின் மதிப்போடு ஒப்பிடப் புறக்கணிக்கலாம். எனவே



$$n_c = \frac{D}{e^{(Ec-E_F)/k_B T}}$$

E_F-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$n_c = D\, e^{[Ec-(E_F+E_V/2)]/k_B T}$$

$$= D\, e^{-Eg/k_B T} \quad (2.5)$$

இத்தொடர்பு கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் செறிவைக் குறிப்பிடுகின்றது.

குறைக்கடத்தியின் மின்கடத்துதிறன்

$$\sigma = en_i\ [\mu_n + \mu_p]$$

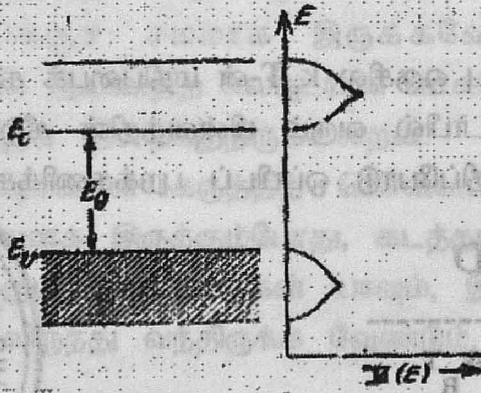
$n_i = n_c$ என்பதால்

$$\sigma = D e^{-Eg/k_B T} . e(\mu_n + \mu_p) \qquad (2.6)$$

இத்தொடர்பு, வெப்பநிலை அதிகரிக்க, குறைக்கடத்தியின் மின்கடத்து திறன் அதிகரிக்கும் என்ற உண்மையைத் தெரிவிக்கக் கூடியதாக இருக்கின்றது.

துல்லியமான வழிமுறை

உண்மையில் கடத்து எலக்ட்ரான் மற்றும் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டைகளின் அகலம், தவிர்க்கைப் பட்டையின் அகலத்தை ஒப்பிட, ஒன்றுக்கொன்று குறைவானதாக இல்லை. கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் E_c முதல் அனந்தம் வரையிலும், இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் சுழிமுதல் E_v வரையிலும் இருப்பதாகக் கொள்ளலாம்.



படம் 2.4 உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் ஆற்றல் நிலை அடர்த்தி

(1) கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் எலக்ட்ரான்களின் செறிவு

n_c என்பது கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் எலக்ட்ரானின் செறிவு என்போம். இது ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள கடத்து எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையாகும்.

$$n_c = \int_{E_c}^{\infty} D(E)\, f(E)\, dE$$

இத்தொகையாக்கத்தின் மேல்வரம்பை அனந்தமாகக் கொண்டிருப்பது, வழிமுறையின் அனுகூலம் கருதியே. இந்த வரம்பெல்லையாலும் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள எல்லா எலக்ட்ரான்களும் விடுபட்டுப் போகாமல் மதிப்பிடப்படுகின்றன. மேலும் F(E) ன் மதிப்பு, கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையில் உயராற்றலுக்கு குறைந்து போகின்றது, $E>>E_F$ என்ற நிலையில் $f(E)=0$ எனவே $E=\infty$ என்று தொகையாக்கத்தின் எல்லையை ஏற்படுத்திக்கொண்டது மதிப்பீட்டை எந்த வகையிலும் பாதிக்காது எனலாம்.

பெர்மி-டிராக் புள்ளியியல் கொள்கைப்படி, கடத்து எலக்ட்ரானின் பட்டையில் ஆற்றல் நிலைகளின் அடர்த்தி

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*_e)^{3/2} (E-E_c)^{1/2}$$

இதில் m_e^* என்பது ஆற்றல்பட்டையில் எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறையாகும், E_c என்பது கீழ்வரம்பாகும். அண்டையிலுள்ள அணுக்கள் மற்றும் மின்னூட்டங்கள், கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் இயங்கும் எலக்ட்ரான்களின் இயக்கத்தில் ஏற்படுத்தும் பாதிப்பை, ஈடுசெய்ய செயலுறுநிறையைக் கருத வேண்டியிருக்கின்றது. அதாவது எலக்ட்ரான், கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருக்கும்போது, அது m^*_e என்ற நிறையுடைய துகள் போல, புறபுலத்தில் செயல்படுகின்றது. இதுபோல இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் நேர்மின் துளையின் செயலுறு நிறையை m_h^* எனக் கொள்ளலாம்.

பெர்மி டிராக் புள்ளியியல் கொள்கைப்படி, கடத்து எலக்ட்ரானின் செறிவு

$$n_e = \int_{E_c}^{\infty} D(E)\, f(E)\, dE$$

$$= \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} \int_{E_c}^{\infty} \frac{(E-E_c)^{1/2}\, dE}{e^{(Ec-E_F)/k_B T} + 1}$$

ஆற்றல் இடைவெளி 1 ev என்ற நெடுக்கையிலும் பெர்மி ஆற்றல் 0.5 ev அளவிலும், அறைவெப்பநிலையில் $k_B T = 1/40$ ev அளவிலும் இருப்பதால், கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் அடிவிளிம்பில் இருக்கும் எலக்ட்ரான்களுக்கு $E_g - E_F / k_B T \cong e^{20} >> 1$. கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள பிற எலக்ட்ரான்களுக்கு இதன் மதிப்பு இன்னும் கூடுதலாகவே இருக்கும். அதனால் பெர்மி சார்பின் பின்னத்திலுள்ள கீழ்ப்பகுதியில் 1ஐ புறக்கணிப்பதால் கணக்கீட்டில் பெரிய அளவில் பிழை ஏற்படுவதில்லை. இதன்படி,

$$n_e = \frac{4\pi}{h^3} (2m^*_e)^{3/2} \int_{E_c}^{\infty} (E-E_c)^{1/2}\; e^{(Ec-E)/k_B T} . dE$$

$$n_e = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} \int_{E_c}^{\infty} (E-E_c)^{1/2} . e^{(E_f-Ec)/k_B T} . e^{(Ec-E)/k_B T}\, dE$$

$E - E_c / k_B T = x$ என்போம். $dE = k_B T . dx$

புதிய மாறிலியின் அடிப்படையில் மேற்கண்ட தொகுப்பாக்கத்தை

$$n_e = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e)^{3/2} (k_B T)^{1/2}\; e^{(E_f-Ec)/k_B T} \int_{E_c}^{\infty} x^{1/2}\, e^{-x}\, dE$$

படித்தரத் தொகுப்பாக்கத்தின்படி

$$\int_0^{\infty} x^{1/2}\, e^{-x} = \sqrt{\pi}/2$$

எனவே

$$n_e = 2\left(\frac{2\pi m^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} e^{(Ef-Ec)/k_B T} \quad (2.7)$$

(2) இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் மின்துளைகளின் செறிவு

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்திகளில் கடத்து எலக்ட்ரான்கள் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள மின்துளைகளின் எண்ணிக்கையும் சமம் என்பதால், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் E என்ற ஆற்றல் நிலை நிரப்பப்படாமல் காலியாக இருப்பதற்கான வாய்ப்பு

$$f_h(E) = 1 - f_e(E) = \frac{1}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1} = \frac{e(E-E_f)k_B T}{e^{(E-E_F)/k_B T} + 1}$$

இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் பட்டையில் $E << E_F$, $e^{(E-E_F)}/k_B T << 1$

எனவே $f_h(E) = e^{(E-E_F)}/k_B T$

இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையின் மேல்விளிம்பிலிருக்கும் மின்துளைகள் m_h* என்ற செயலுறு நிறையுடைய துகள்போலச் செயல்படுகின்றன. இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் மின்துளைகளின் ஆற்றல்நிலை அடர்த்தி

$$D_h(E)dE = \frac{4\pi}{h^3}(2m^*_h)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}$$

பெர்மி-டிராக் புள்ளியியல் கொள்கைப்படி

$$n_h = \int_{-\infty}^{E_v} D_h(E)\,[1-f_e(E)]\,dE$$

$E < E_f$ என்பதால் $f_h(E)$-ன் மதிப்பு e-ன் அடுக்கில் சரிவுறுகின்றது. அதாவது இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் மேல்மட்டத்திலிருந்து தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலைக்குக் கீழிறங்க, மின்துளைகளை இனமறிவதற்கான வாய்ப்பு மிகவும் குறைந்து போகின்றது. எனவே கீழ் வரம்பை - ∞ என்று மாற்றிக் கொள்வதால், கணக்கீட்டில் எவ்விதப் பாதிப்பும் ஏற்படுவதில்லை. எனவே

$$n_h = \frac{4\pi}{h^3}(2m_h^*)^{3/2} \int_{-\infty}^{E_v} (E_v-E)^{1/2}\, e^{(E-E_F)/k_BT}\, dE$$

$$= \frac{4\pi}{h^3}(2m_h^*)^{3/2}\, e^{(Ev-Ef)/k_BT} \int_{-\infty}^{E_v} (E_v-E)^{1/2}\, e^{(E-Ev)/k_BT}\, dE$$

E_v-E / k_BT = x, dE = -k_BT dx. எனவே புதிய மாறிலியின் அடிப்படையில், மேற்கண்ட தொகையாக்கத்தை

$$n_h = \frac{4\pi}{h^3}(2m_h^*)^{3/2}\, e^{(Ev-E_f)/k_BT} \int_{\infty}^{0} (xk_BT)^{1/2}\, e^{-x}\,(-k_BTdx)$$

$$n_h = \frac{4\pi}{h^3}(2m_h^* k_BT)^{3/2}\, e^{(Ev-E_f)/k_BT} \int_{\infty}^{0} (x)^{1/2}\, e^{-x}\, dx$$

இதில் வரும் எதிர்குறி, தொகையாக்கத்தில் வரம்புகளை மாற்றிக் கொள்வதினால் நேர் செய்யப்பட்டுள்ளது. படித்தரத் தொகையாக்கத்தைக் கொண்டு

$$n_h = 2\left(\frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^3}\right)^{3/2} e^{(Ev-E_f)/k_B T} \quad (2.8)$$

(3) பெர்மி ஆற்றல்

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்திகளில் இருவகையான மின்னூர்திகளும் சமஅளவிலேயே இருக்கும். ஆனால் எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் வெவ்வேறு ஆற்றல் பட்டைகளில் இருக்கும். எனவே

$$n_e = n_h$$

முன்பு வருவித்த சமன்பாடுகளைக் கொண்டு

$$(m_e^*)^{3/2} \quad e^{(E_f-E_c)/k_B T} = \quad (m_h^*)^{3/2} \quad e^{(Ev-Ef)/k_B T}$$

அல்லது

$$e^{(2Ef-Ec-Ev)/k_B T} \quad = [\, m_h^* / m_e^* \,]^{3/2}$$

இருமருங்கும் மடக்கை எடுத்தால்

$$(2E_f-E_c-E_v)/k_BT \; = 3/2 \log [\, m_h^* / m_e^* \,]$$

அல்லது

$$E_f = (E_c+E_v)/2 + 3/4\, k_BT \log [\, m_h^* / m_e^* \,] \quad (2.9)$$

எலக்ட்ரானின் செயலுறு நிறையும், மின்துளையின் செயலுறுநிறையும் சமமெனில்,

$$m_h^* = m_e^*$$

இந்நிலையில்

$$E_f = (E_c+E_v)/2 \quad (2.10)$$

அதாவது பெர்மி ஆற்றல்நிலை மிகச்சரியாக, கடத்து மற்றும் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டைகளுக்கிடையில் மையங் கொண்டிருக்கின்றது. ஆனால் உண்மையில் m_h^* ன் மதிப்பு m_e^* ன் மதிப்பை விட அதிகமாக இருக்கும். மேலும் பெர்மி ஆற்றல் வெப்பநிலை

T-ன் அதிகரிப்பிற்குச் சிறிய அளவில் அதிகரிக்கின்றது. அதனால் வெப்பநிலை உயர்விற்கு பெர்மி ஆற்றல் மட்டம் சற்று மேலுயர்ந்து காணப்படும் எனலாம்.

(4) ஆற்றல் இடைவெளியின் அடிப்படையில் மின்னூர்திகளின் செறிவு

பெர்மி ஆற்றலுக்கான விளக்கத்திலிருந்து

$$E_f = (E_c+E_v)/2 + 3/4\, k_BT \log [\, m_h^* / m_e^* \,]$$

என அறியலாம். இருமருங்கும் E_c-யைக் கழிக்க

$$E_f - E_c = (E_v-E_c)/2 + 3/4\, k_BT \log [\, m_h^* / m_e^* \,]$$

$$- E_g/2 + 3/4\, k_BT \log [\, m_h^* / m_e^* \,]$$

இதுபோல E_v லிருந்து E_f யைக் கழிக்க

$$E_v - E_f = - E_g/2 - 3/4\, k_BT \log [\, m_h^* / m_e^* \,]$$

இம்மதிப்புகளை மின்னூர்திகளின் செறிவிற்காக வருவிக்கப்பட்ட தொடர்புகளில் ஈடுபடுத்த

$$n_e = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_BT}{h^2} \right)^{3/2} e^{[-E_g/2k_BT + 3/4 \log (m_h^*)/m_e^*]}$$

$$= 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_BT}{h^2} \right)^{3/2} [m_h^* / m_e^*]^{3/4}\, e^{[-E_g/2k_BT]}$$

$$= 2 \left(\frac{2\pi k_BT}{h^2} \right)^{3/2} [m_h^* / m_e^*]^{3/4}\, e^{[-E_g/2k_BT]} \qquad (2.11)$$

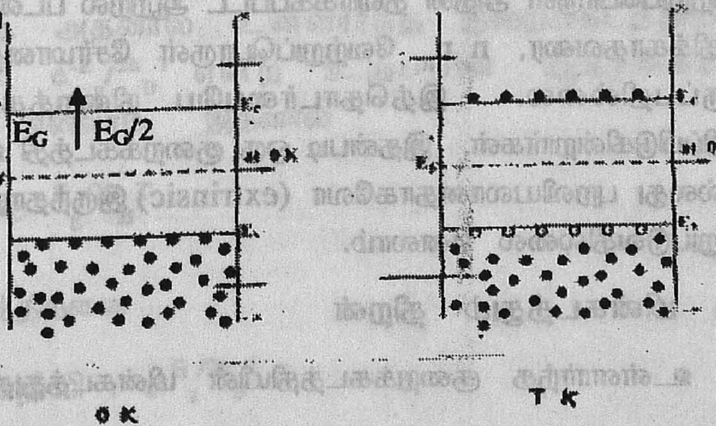
இதைப்போல மின்துளைகளின் செறிவிற்கும் பெறலாம்.

$$n_h = 2\left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^{3/2} [m_e^* / m_h^*]^{3/4} e^{[-E_g/2k_B T]} \quad (2.12)$$

இம்முடிவுகள்

$n_e = n_h = n_i$

என்று தெரிவிக்கின்றன. மேலும் n_e மற்றும் n_h-ன் மதிப்புகள் e-ன் சார்பாக, வெப்பநிலை அதிகரிக்க அதிகரிக்கின்றன என்ற உண்மையையும் இதிலிருந்து உறுதி செய்யலாம். பெர்மி ஆற்றல் மட்டம் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின்கீழ் விளிம்பிலிருந்தும், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் மேல் விளிம்பிலிருந்தும் ஒருசில $k_B T$ அளவு விலகி இருக்கும் போது இது ஏற்றுக் கொள்ளத்தக்க தோராயமாக இருக்கின்றது. (அதாவது $Eg>k_B T$) ஜெர்மானியம் (E_g =0.78 ev) சிலிகான் (Eg = 1.2ev) இதற்கு ஒத்தும் இண்டியம் ஆண்டிமனி (In,Sb) (E_g = 0.18 ev) இதற்கு இணக்கமின்றியும் உள்ளன.



படம். 2.5 உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் பெர்மி ஆற்றல் நிலை

$m_e^* = m_h^*$ என்று கொண்டால் $E_f = (E_c + E_v/2)$, $E_c - E_v = E_g$ என்பதால் $E_f = (E_c - E_g/2)$, $E_f = E_v + E_g/2$ என்று நிறுவலாம். அதாவது பெர்மி ஆற்றல் மட்டம், கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையின்கீழ் விளிம்பிலிருந்து எவ்வளவு தொலைவு விலகி இருக்கின்றதோ, அதே தொலைவு, இணைதிற

எலக்ட்ரான் பட்டையின் மேல் விளிம்பிலிருந்து விலகியிருக்கின்றது என்று முடிவு செய்யலாம்.

(6) நிறைத்தாக்க விதி (law of mass action)

n_e மற்றும் n_h க்கான தொடர்புகளைப் பெருக்க

$$n_e \cdot n_h = 4 \left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^3 (m_e^* \cdot m_h^*)^{3/2} \cdot e^{-E_g/2k_B T}$$

ஆற்றல் பட்டை இடைவெளி ஆற்றல் கொடுக்கப்பட்ட குறைக்கடத்திக்கு மாறிலி என்பதால், n_e மற்றும் n_h இவற்றின் பெருக்கல் பலன் உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியிலுள்ள ஒவ்வொரு வகை மின்னூர்தியின் அடர்த்தியின் இருமடிக்குச் சமமாக இருக்கும்.

$$n_e \cdot n_h = n_i^2 = \text{மாறிலி } T^3 e^{-E_g/k_B T} \qquad (2.13)$$

இத்தொடர்பு $n_e n_h$ அல்லது n_i^2 வெப்பநிலை மற்றும் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டையின் அகலம் இவற்றை மட்டும் சார்ந்த ஒரு மாறிலியாக இருக்கும் எனத் தெரிவிக்கின்றது. ஒரு குறைக்கடத்தியில் சேர்க்கப்படும் வேற்றுப்பொருள் அதன் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் அகலத்தைப் பாதிக்காதவரை, $n_e n_h$ வேற்றுப்பொருள் சேர்மானத்தைப் பொறுத்தும் இருப்பதில்லை. இத்தொடர்பையே நிறைத்தாக்க விதி என்று குறிப்பிடுகின்றார்கள். இதன்படி ஒரு குறைக்கடத்தி உள்ளார்ந்ததாகவோ அல்லது புறவியலானதாகவோ (extrinsic) இருந்தாலும் $n_e n_h$ -ன் மதிப்பு மாறுபடுவதில்லை எனலாம்.

(7) மின்கடத்தும் திறன்

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியின் மின்கடத்துதிறன்

$$\sigma_i = |e| [n_e \mu_e + n_h \mu_h]$$

$n_e = n_h = n_i$ என்பதால்

$$\sigma_i = |e| n_i [\mu_e + \mu_h]$$

இதில் n_i-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$\sigma_i = 2\,|e|\left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^{3/2} [(m_e^*)\, m_h^*\,]^{3/4}\, e^{-E_g/2k_B T}\, [\mu_e + \mu_h] \quad (2.14)$$

எலக்ட்ரான் மற்றும் மின்துளைகளின் நகர்திறன் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருக்கின்றது. சாதாரணமான வெப்பநிலை நெடுக்கையில் உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் இது $T^{-3/2}$ க்குஏற்ப மாறுகின்றது எனலாம். அறைவெப்பநிலையில் இது உலோகங்களுக்கு இருப்பதைக் காட்டிலும் குறைக்கடத்திகளுக்கு அதிகமாயுள்ளது. குறைக்கடத்திகளில் கூடுதலான நகர்திறனுக்கு, வெப்பநிலை சார்ந்த மாற்றம், நீங்கலாக மின்னூர்திகளின் மெதுவான இயக்கவேகமும் பங்கேற்றுள்ளது. அதனால் குறைக்கடத்திகளில் கடத்து எலக்ட்ரானின் தளர்வு நேரம் அதிகரிக்கின்றது. எலக்ட்ரான் மற்றும் மின்துளைகளின் நகர்திறன்கள் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதுடன்,

$$\left(\frac{2\pi k_B T}{h^2}\right)^{3/2} [(m_e^*)\,(m_h^*)\,]^{3/4}$$

வெப்பநிலையைப் பொறுத்து பெறும் மாற்றத்தால் பெரிதும் நேர் செய்யப்படுகின்றது. அதனால் உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியின் மின்கடத்துதிறன் $e^{-E_g/2k_B T}$ என்ற உறுப்பின் ஆளுகைக்கு உட்பட்டிருக்கின்றது எனலாம். இதனால்

$$\sigma = \text{மாறிலி}\ e^{-E_g/2k_B T}$$

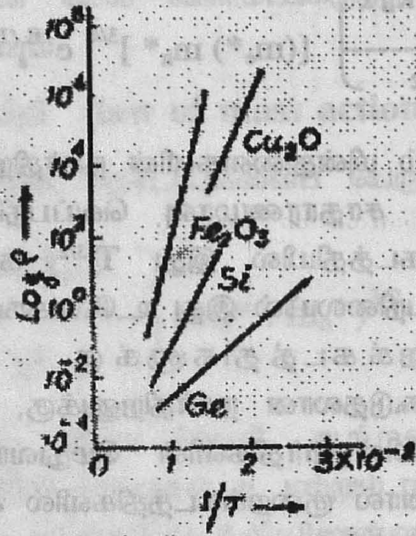
என்றும், மின்தடைத்திறனை

$$\rho = 1/\sigma = \text{மாறிலி}\ .\ e^{E_g/2k_B T}$$

என்றும் குறிப்பிடலாம். இருமருங்கும் மடக்கை எடுக்கையில்

$$\log \rho = \text{மாறிலி} + E_g/(2k_B T)$$

இது ஒரு நேர்கோட்டிற்கான சமன்பாடாகும். $\log \rho$ விற்கும் $1/T$ க்கும் வரைபடம் வரைந்து இதை உறுதிப்படுத்தலாம்.



படம் 2.6 log ρ - 1/T வரைபடம் - ஆற்றல்பட்டை இடைவெளியை அறியும் வழிமுறை

இவ்வரைபடத்திலிருந்து வரைகோட்டின் சரிவை மதிப்பிட்டு, சரிவு $E_g/2k_B$ என்ற தொடர்பிலிருந்து ஆற்றல் இடைவெளியைக் கணக்கிடலாம். இது ஜெர்மானியத்திற்கு 0.78ev என்ற மதிப்பையும், சிலிகானுக்கு 1.21 ev என்ற மதிப்பையும் தந்துள்ளது. சில பொருட்களின் மின்தடைத் திறனும், ஆற்றல் இடைவெளியும் அட்டவணை 8.2ல் தரப்பட்டுள்ளன.

அட்டவணை 2.2

பொருட்களின் மின்தடைத்திறனும் ஆற்றல் இடைவெளியும்

பொருள்	மின்தடைத்திறன் ஓம்-மீ.	ஆற்றல் இடைவெளி எ.வோ
கார்பன்	10^{14}	5.20
சிலிகான்	3×10^{3}	1.21
ஜெர்மானியம்	0.47	0.78
டின் (சாம்பல்நிற)	2×10^{-6}	0.08
காரீயம்	2×10^{-7}	0

இதில் கார்பன் போன்ற பொருட்களுக்கு ஆற்றல் இடைவெளி அதிகமாகவும், டின், ஈயம் போன்ற பொருட்களுக்கு மிகக்குறைவாகவும் இருப்பதால், வேற்றுப்பொருள் சேர்க்கையால் அவற்றின் மின்

கடத்துதிறனை அதிகரிக்கமுடிவதில்லை. சிலிகான், ஜெர்மானியத்தில் இது இயலுவதாக இருக்கின்றது.

2.5 புறவியலான குறைக்கடத்தி

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியின் மின்கடத்துதிறனை, அதனோடு ஒரு வேற்றுப் பொருளைக் கலந்து அதிகரித்துக் கொள்ளமுடியும். எடுத்துக்காட்டாக சிலிகானில் 10^5 சிலிகான் அணுக்களுக்கு 1 போரான் அணு வீதம் வேற்றுப் பொருளைச் சேர்க்கும்போது, அதன் மின்கடத்து திறன் 10^3 மடங்கு அறைவெப்பநிலையில் அதிகரிக்கின்றது. இப்படி வேற்றுப்பொருளைக் கலந்து, மின்கடத்துதிறனில் மாற்றம் ஏற்படுத்தப்பட்ட குறைக்கடத்திகளைப் புறவியலான குறைக்கடத்தி என்பர். இதன் மின்கடத்து திறன் வேற்றுப் பொருளின் செறிவைப் பெரிதும் பொறுத்திருக்கின்றது.

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்திகளில் சேர்க்கப்படும் வேற்றுப் பொருளை இருவகைப்படுத்தலாம். அவை கொடுப்பான் (Donor) என்றும் ஏற்பான் (Acceptor) என்றும் கூறப்படுகின்றன. இதனால் புறவியலான குறைக்கடத்திகளில் இருவகை உண்டு. அவை

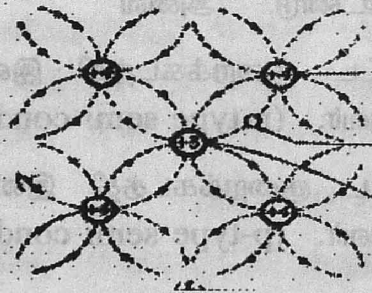
(அ) எலக்ட்ரான் செறிவூட்டப்பட்ட குறைக்கடத்தி இதை ெ-வகை குறைக்கடத்தி என்று கூறுவர். (n-type semi conductor)

(ஆ) மின்துளை செறிவூட்டப்பட்ட குறைக்கடத்தி இதை p- வகை குறைக்கடத்தி என்று கூறுவர். (p-type semi conductor)

n-வகைக் குறைக்கடத்தி

உள்ளார்ந்த ஜெர்மானியம் அல்லது சிலிகான் குறைக்கடத்தியில் மிக நுண்ணிய அளவில் தனிம அட்டவணையில் 5வது பட்டியலைச் சேர்ந்த (V-group) தனிமங்களில் ஏதாவது ஒன்றை கலந்தால் அதை ே-வகைக் குறைக்கடத்தி என்பர். 5வது பட்டியலில் உள்ள தனிமங்கள் பாஸ்பரஸ் (13), ஆர்சைனிக் (33), ஆண்டிமணி (51), பிஸ்மத் (83) போன்றவைகளாகும். இவற்றின் இணைதிறன் 5 என்பதால், இவை படிகத்தில் நிலைப்படும்போது 4 இணைதிற எலக்ட்ரான்களால் அருகாமையில் உள்ள ஜெர்மானியம் சிலிகான் அணுக்களோடு சகப்பிணைப்பை, உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் ஒரு ஜெர்மானியம் சிலிகான் அணு ஏற்படுத்துவதைப் போலச் செய்கின்றன. எஞ்சிய ஒரு இணைதிற எலக்ட்ரான் விடுவிக்கப்பட்டு கட்டற்ற எலக்ட்ரானாக

மின்கடத்தலுக்கு அனுகூலமாகின்றது. n வகைக் குறைக்கடத்திகளில் வெப்பநிலை சார்ந்த சகப்பிணைப்பு முறிவின் காரணமாக (நுண்ணிய அளவில்) சம கடத்து எலக்ட்ரான்களும், மின்துளைகளும், வேற்றுப் பொருள் கலப்பால் அதன் செறிவிற்கு ஏற்ப கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களும் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. n வகைக் குறைக்கடத்திகளில் கடத்து எலக்ட்ரான்களின் மொத்த எண்ணிக்கை மின்துளைகளை விடக் கூடுதலாக இருப்பதால், இதன் மின் கடத்தும் பண்பு முக்கியமாக எலக்ட்ரான்களால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. அதனால் இவ்வகைக் குறைக் கடத்திகளை எதிர்மின் வகைக் குறைக்கடத்தி (Negative) என்பது வழக்கம். எலக்ட்ரான்கள் அதிகமாகவும், மின்துளைகள் குறைவாகவும் இருப்பதால், n வகைக் குறைக்கடத்திகளில் எலக்ட்ரான்கள் பெரும்பான்மை மின்ஊர்திகள் (majority carrier) என்றும், மின்துளைகள் சிறுபான்மை மின்ஊர்திகள் (minotiry carrier) என்றும் கூறப்படும். மின்கடத்தலுக்கு எலக்ட்ரானை நல்கும் குறைக்கடத்தியில் சேர்க்கப்படும் வேற்றுப் பொருளைக் கொடுப்பான் (donor) என்றும் அவற்றின் அணுக்களை கொடையணு (donor atom) என்றும் கூறுவர்.



படம் 2.7 N-வகைக் குறைக்கடத்தி

கொடையணுக்கள், படிக அணித்தளத்தில் படிகமூல அணுக்களைப் போலவே அணித்தளக் கட்டமைப்பில் ஈடுபடுகின்றன. தனித்து வேற்றினமாகக் காட்டிக் கொள்வதில்லை. இதை எக்ஸ்கதிர் விளிம்பு விளைவு (x-ray diffraction) சோதனைகள் உறுதி செய்துள்ளன. மேலும் சகப்பிணைப்பில் பங்கேற்கமுடியாது தனித்து விடப்பட்ட கொடையணுவின் ஐந்தாவது எலக்ட்ரானைக் கணிசமான அளவு குறைந்த ஆற்றலூட்டி, அதாவது அறைவெப்பநிலையில் இயல்பாகக் கிடைக்கும் வெப்பஇயக்க ஆற்றலைக் கொண்டே அணுக்கருப் பிணைப்பிலிருந்து விடுவித்து விடமுடியும். இதையே வெப்பஅயனியாக்கம் (Thermal Ionization) என்பர்.

கொடையணுவிலிருந்து ஓர் எலக்ட்ரான் நீக்கப்பட்டால், அது ஓரலகு நேர்மின்னூட்டம் கொண்ட அயனிபோலப் படிக அணித்தளத்தில் நிலைகொள்ளும். சகப்பிணைப்பில் ஈடுபடாது, தளர்ச்சியாக கட்டுண்டிருக்கும் எலக்ட்ரானுக்கும், அதன் அயனிக்கும் இடைப்பட்டவெளியில் குறைக்கடத்தியின் பல அணுக்கள் இடம்பெற்றிருக்கும். எனவே தளர்ச்சியான எலக்ட்ரானுக்கும், அணித்தளத்தில் நிலையான அயனிக்கும் இடைப்பட்ட நிலைமின் ஈர்ப்புவிசையை மதிப்பிடும்போது, இடைஊடகமாக வெற்றிடத்தைக் கொள்ளாது, படிக ஊடகத்தைக் கருதவேண்டும்.

போர் அணுமாதிரியமைப்புக் கொள்கைப்படி, அணுஎலக்ட்ரான் ஆற்றலை

$$E = \frac{-m^*e^4}{8\varepsilon_0^2 n^2 h^2}, \quad n=1,2,3,\ldots\ldots\ldots$$

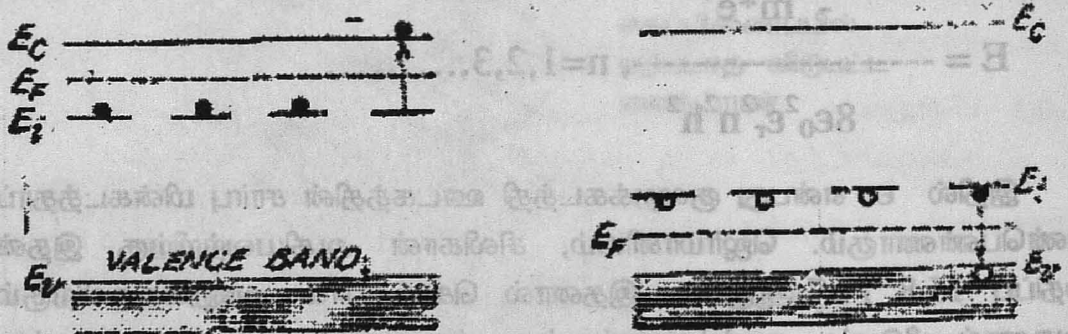
குறைக்கடத்தி ஊடகத்தின் மின்கடத்தாப் பண்பெண்ணையும் கருத்திற் கொண்டால்

$$E = \frac{-m^*e^4}{8\varepsilon_0^2 \varepsilon_r^2 n^2 h^2}, \quad n=1,2,3,\ldots\ldots\ldots$$

இதில் εr என்பது குறைக்கடத்தி ஊடகத்தின் சார்பு மின்கடத்தாப் பண்பெண்ணாகும். ஜெர்மானியம், சிலிகான் ஆகியவற்றிற்கு இதன் மதிப்பு 15.8, 11.7 ஆகும். இதனால் கொடுப்பான் அணுக்கருவிற்கும் அதனால் விடுபட்ட எலக்ட்ரானுக்கும் உள்ள கூலும் வினை 15.8 மடங்கு ஜெர்மானியத்திலும், 11.7 மடங்கு சிலிகானிலும் வலுவிழந்து போகின்றன.

அணுக்கருவோடு கட்டுண்ட எலக்ட்ரானை வெளியேற்றி கட்டற்ற எலக்ட்ரானாக மாற்றுவதற்குத் தேவையான ஆற்றல் அயனியாக்க ஆற்றல் எனப்படும். ஜெர்மானியத்திற்கு இதன் மதிப்பு 0.0105 ev, சிலிகானுக்கு இதன் மதிப்பு 0.0291ev ஆகும். சாதாரணமாக அறைவெப்பநிலையில் வெப்பஆற்றல் 0.025 ev என்ற அளவில் இருக்கும் என்பதால், கொடையணுக்களின் அயனியாக்கம் புறத்தூண்டுதல் ஏதுமின்றித் தானாகவே நிகழ்கின்றது எனலாம்.

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் வேற்றுப் பொருள் கலப்பு அதன் ஆற்றல் நிறமாலையில் குறிப்பிடும்படியான மாற்றத்தை ஏற்படுத்துகின்றது. n-வகைக் குறைக்கடத்தியில் வேற்றுப்பொருள் இருக்கும் மின்துளையின் செறிவை மாற்றாது, கூடுதலாக எலக்ட்ரான்களை வழங்குகின்றது. உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் கடத்து எலக்ட்ரானும், இணைதிற எலக்ட்ரானும் அவைகளுக்குரிய ஆற்றல்பட்டைகளில் மட்டுமே இருக்கும். இடைப்பட்ட தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையில் இருக்குமாறு எந்தவொரு எலக்ட்ரானும் இருக்க முடியாது. கொடையணு வழங்கும் எலக்ட்ரான்களின் அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் நிலைகள் இந்த தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையில் அமையலாம். n-வகைக் குறைக்கடத்திகளில் இக்கூடுதல் ஆற்றல் நிலை கடத்துப்பட்டைக்கு அருகாமையில் தோன்றியிருக்கின்றது. இந்த ஆற்றல் நிலைக்கும் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் அடிநிலைக்கும் உள்ள வேறுபாடு 0.01எ.வோ. என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது. அறை வெப்பநிலையில் வெப்ப ஆற்றல் சாதாரணமாக 0.08 எ.வோ. என்ற நெடுக்கையில் இருப்பதால், கொடையணுவிலிருந்து விடுவிக்கப்பட்ட எல்லா எலக்ட்ரான்களும் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் இடம்பெறுகின்றன.



படம் 2.8 n-வகைக் குறைக்கடத்தியில் ஆற்றல்பட்டை அமைப்பு

சார்பிலா சுழிவெப்பநிலையில் சகப்பிணைப்பில் ஈடுபடாத கொடையணுவின் எலக்ட்ரான்கள் எல்லாம், கொடையணுவின் அணுக்கருவோடு இணைந்து இயங்குகின்றன. அதாவது அவையெல்லாம் கொடுப்பானின் எலக்ட்ரான் ஆற்றல் நிலையில் இருக்கின்றன. எனவே கடத்தலுக்குப் பயன்தருகின்ற கட்டற்ற எலக்ட்ரானாகக் கடத்து

எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டையில் இல்லாதிருக்கும். T=0K வெப்பநிலையில், புறவியலான குறைக்கடத்தியும், உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்திபோல, மின்கடத்தாப் பொருளை ஒத்திருக்கும். மிகச் சிறிதளவு வெப்பநிலை உயர்வு ஏற்படினும், வெப்பஞ்சார்ந்த படிக அணித்தள அதிர்வுகளினால், கொடையணுவோடு பிணைந்து இயங்கி வந்த எலக்ட்ரான்கள், மிக எளிதாகக் கொடுப்பான் ஆற்றல் நிலையிலிருந்து கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குள் இடம்பெறுகின்றன.

எலக்ட்ரான் நீங்கப்பெற்ற கொடையணு நேர்மின்னூட்டங் கொண்ட அயனியாக இருக்கும். இது மின்துளை போலச் செயல்படுவதில்லை. கொடையணுவிலிருந்து விடுபட்ட எலக்ட்ரான்கள் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையைச் சேர்ந்தவையல்ல என்பது மட்டுமின்றி அவை சகப்பிணைப்பின் புனராக்கங்களில் ஈடுபடுவதுமில்லை. அதனால் நேர்மின் அயனியான வேற்றுப்பொருள் அணுக்கள் படிக அணித்தளத்தில், நேர்மின் அயனியாகவே நிலைத்திருக்கின்றன. இவை மின்கடத்தலுக்குத் துணைபுரிவதில்லை.

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் பெர்மி ஆற்றல் நிலை மிகச்சரியாகத் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் நடுவில் அமைந்திருக்கும். இது குறைக்கடத்தியில் சம அளவுச் செறிவுடன் கடத்து எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் இருப்பதைக் குறிப்பிடுகின்றது. n-வகைக் குறைக்கடத்தியில் கொடையணு அயனிக்கப்பட்டு, அதன் எலக்ட்ரான்கள், கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குக் கீழே வெகுஅருகில், ஆற்றல் நிலை கொண்டுள்ளன. இதனால் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலிருந்து, வெப்பக்கிளர்ச்சிமூலம் எலக்ட்ரான்கள், கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்குச் செல்ல முடிவதில்லை. அதனால் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள மின்துளைகள் குறைவாக இருக்கின்றன. பெர்மி ஆற்றல் நிலை என்பது அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல் நிலைகளில் எலக்ட்ரான் இடம்பெற்றிருப்பதற்கான வாய்ப்பைக் குறிப்பிடுவதால், n -வகைக் குறைக்கடத்திகளில் இது கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்கு நெருக்கமாக இடம்பெயருகின்றது. இதை நாம் கணிதவியல் முறைப்படி நிறுவமுடியும்.

அயனிக்கப்பட்ட கொடையணுக்களின் செறிவை N_d என்போம். சாதாரணமான வெப்பநிலைகளில் கொடையணு ஆற்றல் நிலைகள் முழுமையாகத் தூண்டப்பட்டிருப்பதால், கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் செறிவு, தோராயமாக

கொடையணுவின் செறிவிற்குச் சமமாக இருக்குமெனலாம். அதாவது $n_e = N_d$. வருவிக்கப்பட்ட n_eன் மதிப்பைக் கொண்டு

$$n = N_d = 2\left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} e^{[E_F - E_c/2k_B T]} \qquad (2.15)$$

$$= N_c\, e^{[E_F - E_c/2k_B T]}$$

இதில்

$$N_c = 2\left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \text{ ஒரு மாறிலி}$$

எனவே $N_c/N_d = e^{[E_F - E_c/2k_B T]}$

இருமருங்கும் மடக்கை எடுத்தால்

$$\text{Log}\,(N_c/N_d) = -(E_F - E_c)/2k_B T$$

அல்லது

$$E_F = E_c - k_B T \log\,(N_c/N_d) \qquad (2.16)$$

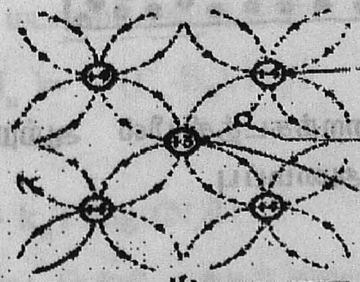
இத்தொடர்பு, பெர்மி ஆற்றல்நிலை, கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின்கீழ் விளிம்பிற்கு அருகில் இருப்பதைப் புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றது.

p-வகைக் குறைக்கடத்தி

உள்ளார்ந்த ஜெர்மானியம் அல்லது சிலிகான் குறைக்கடத்தியில் மிக நுண்ணிய அளவில் தனிம அட்டவணையில் 3வது பட்டியலைச் சேர்ந்த (III group) தனிமங்களில் ஏதாவதொன்றைக் கலந்தால், அதை p-வகைக் குறைக்கடத்தி என்பர். 3வது பட்டியலிலுள்ள தனிமங்கள் போரான்(5), அலுமினியம் (13), காரீயம் (31), இண்டியம் (49), தாலியம் (81) போன்றவைகளாகும். இவற்றின் இணைதிறன் 3, அதாவது அவற்றின் புறக்கூட்டில் 3 எலக்ட்ரான்கள் மட்டுமே இருக்கும். வேற்றுப் பொருளின் அணுக்கள் உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியின் மூல அணுக்களைப்போல

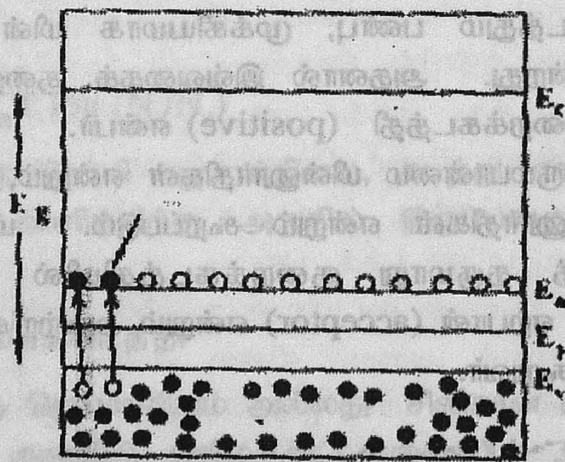
படிக அணித்தளத்தில் இடம்பெறுகின்றன. அப்படி இடம்பெறும் ஒரு வேற்றுப் பொருளணு, அருகாமையிலுள்ள நான்கு ஜெர்மானியம் சிலிகான் அணுக்களில் மூன்று அணுக்களோடு மட்டும் சகப்பிணைப்பை ஏற்படுத்திக்கொள்ளும். நான்காவது ஜெர்மானியம் சிலிகான் அணு, வேற்றுப்பொருளணுவோடு ஏற்படுத்திக் கொள்ளும் சகப்பிணைப்பிற்கு ஓர் எலக்ட்ரான் குறைவாக இருப்பதால் அது முழுமை பெறாததாக விளங்கும். இந்த அமைப்பு எலக்ட்ரான் நாட்டங்கொண்டிருப்பதால், அருகாமையிலுள்ள சகப்பிணைப்பை முறித்து அதிலிருந்து ஓர் எலக்ட்ரானை உட்கவர்ந்து தன்னோடு இணைத்துக் கொள்ளுகிறது. அதாவது மின்துளையை இடமாற்றம் செய்து விடுகின்றது. இந்த இடமாற்றம் தொடர்ந்து நடைபெறுவதால், புறமின்புலத்தில் இந்த மின்துளைகள் மின்கடத்தலுக்குத் துணைபுரிகின்றன.

இவ்வகைக் குறைக்கடத்திகளில் வெப்பநிலை சார்ந்த சகப்பிணைப்பின் முறிவால் நுண்ணிய அளவில் சம எண்ணிக்கையில் கடத்து எலக்ட்ரான்களும் மின்துளைகளும், வேற்றுப்பொருள் கலப்பால் அதன் செறிவிற்கு ஏற்பக் கூடுதல் மின்துளைகளும் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றன. இவ்வகைக் குறைக்கடத்திகளில் மின் துளைகளின் எண்ணிக்கை எலக்ட்ரான்களைவிடக் கூடுதலாக இருப்பதால், இவற்றின் மின்கடத்தும் பண்பு, முக்கியமாக மின் துளைகளால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. அதனால் இவ்வகைக் குறைக்கடத்திகளை நேர்மின்வகை குறைக்கடத்தி (positive) என்பர். மேலும் இதில் மின்துளைகள் பெரும்பான்மை மின்னூர்திகள் என்றும், எலக்ட்ரான்கள் சிறுபான்மை மின்னூர்திகள் என்றும் கூறப்படும். மின்கடத்தலுக்கு மின்துளைகளைத் தருமாறு குறைக்கடத்தியில் சேர்க்கப்படும் வேற்றுப்பொருளை ஏற்பான் (acceptor) என்றும் அவற்றின் அணுக்களை ஏற்பணு என்றும் கூறுவர்.



படம் 2.9 p-வகைக் குறைக்கடத்தி

மின்துளைகளில் இடப்பெயர்வுக்கு சகப்பிணைப்பின் முறிவு அவசியமாகின்றது. இது நிகழ எலக்ட்ரானுக்குக் கூடுதல் ஆற்றல் தேவை. சார்பிலா தனிச்சுழி வெப்பநிலையில் இவ்வாற்றலைப் பெறுவதற்கு ஆற்றல் மூலம் ஏதும் இல்லாததால், உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியைப்போல, ஒரு மின்கடத்தாப் பொருளாக விளங்குகின்றது. இருப்பினும் வேற்றுப்பொருள் கலப்பால் படிகத்தின் ஆற்றல் நிலையில் குறிப்பிடும்படியான மாற்றம் ஏற்படுகின்றது. உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் மின்துளைகள் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் மட்டுமே இருக்கும். தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையில் இருக்குமாறு மின்துளைகளின் ஆற்றல்நிலை அமைந்திருப்பதில்லை. வேற்றுப் பொருள் கலக்கும் போது ஏற்பனு எலக்ட்ரான்களின் அனுமதிக்கப்படும் ஆற்றல் நிலைகள் இப்பகுதியில் அமையலாம். p-வகை குறைக்கடத்திகளில் இக்கூடுதல் ஆற்றல் நிலை, இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு மேலே அருகாமையில் தோன்றியிருக்கின்றது. இதன் ஆற்றல் நிலைக்கும், இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையின் மேல்நிலைக்கும் உள்ள வேறுபாடு 0.01 ev என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது.



படம் **2.10 p** வகை குறைக்கடத்தியில் ஆற்றல் பட்டை அமைப்பு

வெப்பநிலை உயரும்போது வெப்பஞ்சார்ந்த படிக அணித்தள அதிர்வுகளினால் ஆற்றலைப்பெற்று, ஜெர்மானிய சிலிகான் அணுக்கருவோடு ஒன்றியங்கி வந்த எலக்ட்ரான் விடுபட்டு, ஏற்பணுவை அடைகின்றது. அதனால் அவ்வெலக்ட்ரான் இணைதிறன் எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு அருகாமையில் உள்ள ஏற்பான் ஆற்றல் மட்டத்தை அடைகின்றது. ஏற்பணுக்கள் அயனியாக்கம் பெறுவதால், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் ஒரு மின்துளை ஏற்படுகின்றது. ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் இந்த மின்துளைகள் வெப்ப ஆற்றலைப் பெற்று, கொடுப்பான் ஆற்றல் நிலையிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் எப்படி ஆற்றலைப் பெற்றுக் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள உயராற்றல் நிலைகளுக்கு இடம்பெயர்கின்றனவோ, அதுபோல இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலைகளுக்கு இடம்பெயர்கின்றன. இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் உள்ள மின்துளைகள், நேர்மின்னூட்டங் கொண்ட மின்னூர்திகளாக விளங்குவதால், அவை மின் கடத்தலுக்குத் துணைபுரிகின்றன.

ஏற்பானின் செறிவை N_a என்போம். சாதாரண வெப்பநிலையில் ஏற்பணு ஆற்றல் நிலைகள் முழுமையாகத் தூண்டப்பட்டிருப்பதால், இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலுள்ள மின்துளைகளின் செறிவு தோராயமாக ஏற்பணுவின் செறிவிற்குச் சமமாக இருக்கும் எனலாம். $n_h = N_a$ என்பதால்,

$$n_h = N_a = 2\left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} e^{(E_v - E_f)/2k_B T} \qquad (2.17)$$

$$= N_c e^{(E_v - E_F)/2k_B T}$$

எனவே $N_c/N_a = e^{(E_v - E_f)/2k_B T}$

இருமருங்கும் மடக்கை எடுத்தால்

$$\log (N_c/N_a) = -(E_v - E_F)/2k_B T$$

அல்லது

$$E_F = E_v + k_B T \log (N_c/N_a) \qquad (2.18)$$

இத்தொடர்பு, பெர்மி ஆற்றல் நிலை, இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் மேல் விளிம்பிற்கு அருகில் இருப்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.

2.6 n-வகை குறைக்கடத்தி

(1) மின்னூர்திகள் செறிவு

வெப்பநிலையை oK லிருந்து அதிகரிக்க, வேற்றுப் பொருள் கலந்த, புறவியலான குறைக்கடத்திகளில் மின்னூர்திகளின் செறிவு அதிகரிக்கின்றது. T என்ற வெப்பநிலையில் ஒரு சமநிலையில் இருக்கும்போது, இம்மின்னூர்திகளின் செறிவை இப்பொழுது மதிப்பிட்டறிவோம். முதலில் n-வகை குறைக்கடத்தியை எடுத்துக்கொள்வோம்.

ஓரலகுப் பருமனிலுள்ள கொடையணு, அயனிக்கப்பட்ட கொடையணு, அயனிக்கப்படாத மின் நடுநிலையிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையை முறையே N_d, N_d^+, N_d^0 என்போம். பெர்மி-டிராக் பங்கீட்டுத்தனச் சார்பின்படி, ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் நிலையில் இடம்பெறும் துகள்களின் எண்ணிக்கையை வரையறுக்க முடியும். இதன்படி

$$N_d^0 = \frac{N_d}{e^{(E_d - E_f)/k_B T} + 1} \qquad (2.19)$$

$E_d < E_f$, $E_f - E_d < k_B T$ என்பதால்

$$N_d^+ = N_d - N_d^0 = \frac{N_d}{e^{-(E_d - E_f)/K_B T}}$$

குறைக்கடத்தி மின்சமநிலையில் இருப்பதால், மொத்தத்தில் அது ஒரு மின்நடுநிலையில் இருக்கும். எனவே

$$N^+_d + n_h = n_e$$

இதில் n_e என்பது கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களின் செறிவாகும். n_h என்பது இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் மின்துளைகளின் செறிவாகும். அமைப்பில் தேவையான அளவு கொடையணுக்கள் இருப்பதால், போதிய கடத்து எலக்ட்ரான்களை வழங்க, அது n_h -ன் மதிப்பை பெரிதும் புறக்கணிக்கத் தூண்டுகிறது. (ஏனெனில் $n_e . n_h = n_i^2$) இதனால் $N_d^+ = n_e$

என்று தோராயமாகக் கருதலாம்.

$$n_e = \frac{N_d}{e^{-(E_d-E_f)/K_BT}} \qquad (2.20)$$

n_e-ன் மதிப்பை இதில் பதிலீடு செய்ய

$$2\left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} e^{(E_f-E_c)/2K_BT} = N_d e^{(E_d-E_f)/K_BT}$$

$$N_c e^{(E_f-E_c)/2K_BT} = N_d e^{(E_d-E_f)/K_BT}$$

இருமருங்கும் மடக்கை எடுத்தால்

$$(E_f-E_c)/k_BT - (E_d-E_f)/k_BT = \log N_d - \log N_e = \log(N_d/N_c)$$

$$2E_f-(E_c+E_d) = k_BT\log(N_d/N_c)$$

அல்லது

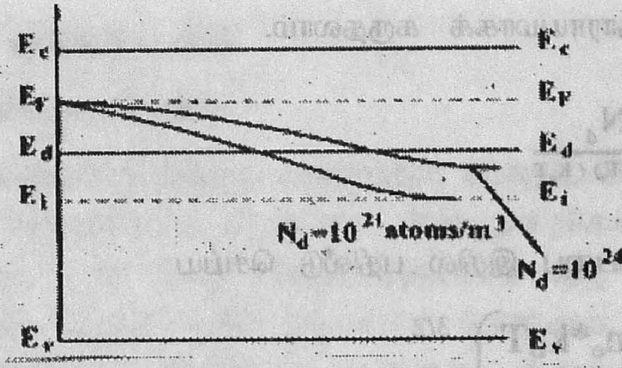
$$E_f = (E_c+E_d)/2 + k_BT/2\log(N_d/N_c) \qquad (2.21)$$

$T = oK$ எனில் $E_f = (E_c+E_d)/2$

இந்நிலையில் பெர்மி ஆற்றல் நிலையானது, கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின்கீழ் விளிம்பிற்கும், கொடையணு ஆற்றல் நிலைக்கும் சரியாக நடுவில் அமைகின்றது.

(2) வெப்பநிலை பொறுத்த பெர்மி ஆற்றல்நிலை மற்றும் மின்னூர்தியின் செறிவில் ஏற்படும் மாற்றம்

n-வகை குறைக்கடத்தியின் வெப்பநிலையை அதிகரிக்கும்போது, E_d என்ற கொடையணு ஆற்றல் நிலையிலுள்ள சில எலக்ட்ரான்கள் தூண்டப்பட்டு கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குள் இடம்பெறலாம்.



படம் 2.11 வெப்பநிலை பொருத்து பெர்மிஆற்றல் நிலையில் ஏற்படும் மாற்றம் (n-வகை குறைக்கடத்தி)

E_F வெப்பநிலையைப் பொருத்து சிறிய அளவில் அதிகரிக்கும் (சமன்பாடு 2.18) வெப்பநிலை அதிகரிக்க மேலும் கூடுதலான கொடையணுக்கள் அயனிக்கப்படுகின்றன. ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் அனைத்து கொடையணுக்களும் அயனிக்கப்பட்டு விடுகின்றன. இதனால் வெப்பநிலை உயர்வு கூடுதலான கடத்து எலக்ட்ரான்களை வழங்குகின்றது எனலாம். இதனால் பெர்மி ஆற்றல் நிலை கீழ் நோக்கிச் சரிந்து இறங்குகின்றது. உயர்வெப்பநிலையில் சகப்பிணைப்பு முறிவால் எலக்ட்ரான்-மின்துளை பேரளவில் உற்பத்தி செய்யப்படுவதால், பெர்மி ஆற்றல் மட்டம், உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியின் பெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தை எட்டுகின்றது. இதைப்போல வேற்றுப்பொருளின் செறிவை அதிகரிக்கும்போதும், கடத்து எலக்ட்ரான்களின் செறிவு அதிகரிப்பதால், பெர்மி ஆற்றல் நிலையும் மேலுயருகின்றது. படம் 2.11 லிருந்து, வெப்பநிலையைப் பொறுத்து தாழ்வுறும் பெர்மி ஆற்றல்நிலை, தாழ்ந்த கொடுப்பான் செறிவைவிட அதிக கொடுப்பான் செறிவிற்குக் குறைவாக இருக்கின்றது என்ற உண்மையை அறிந்து கொள்ள முடிகின்றது. உயரளவு வேற்றுப்பொருள் கலந்த புறவியலான குறைக்கடத்தியில் எல்லா கொடையணுக்களும் அயனிக்கப்பட்டபிறகே அது உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி போலச் செயல்படும் என்பதால் அப்படிப்பட்ட பண்பு வெளிப்படுத்தப்படுகின்றது.

(3) கடத்து எலக்ட்ரான் செறிவிற்கும், கொடையணுவின் செறிவிற்கும் உள்ள தொடர்பு

சமன்பாடு (2.15)ல் E_F -ன் மதிப்பை (2.20)லிருந்து பெற்று பதிலீடு செய்து இத்தொடர்பைப் பெறலாம்.

$$e^{(E_F-E_c)/2k_BT} = e^{[(E_c+E_d)/2 + k_BT/2 \log(N_d/N_c) - E_c] k_BT}$$

$$e^{(E_d-E_c)/2k_BT} . (N_d/N_c)^{1/2}$$

இதில்,

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

எனவே

$$n_e = N_c . e^{-\Delta E/2k_BT} . (N_d/N_c)^{1/2}$$

$$= (N_c N_d)^{1/2} . e^{-\Delta E/2k_BT}$$

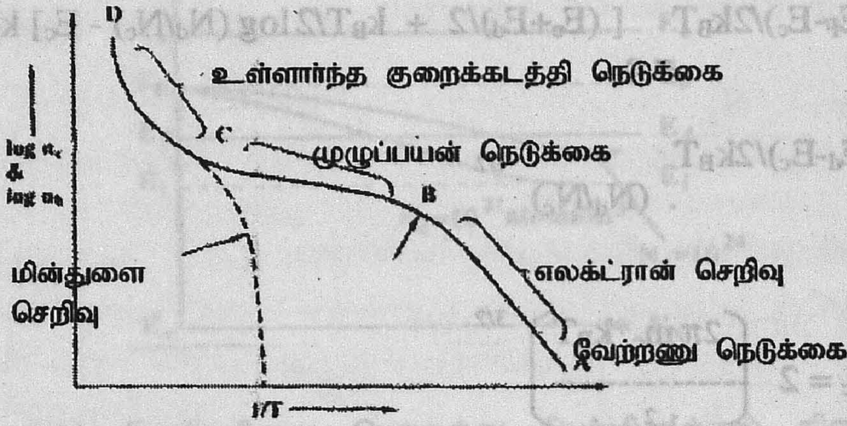
$$= (2N_d)^{1/2} \left(\frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/4} . e^{-\Delta E/2k_BT} \qquad (2.22)$$

இதில் $\Delta E = E_c - E_d$, இது கொடையணுவின் அயனியாக்க ஆற்றலைக் குறிக்கின்றது. இத்தொடர்பிலிருந்து நாம் கீழ்க்கண்ட உண்மைகளை அறிந்து கொள்ளலாம்.

(1) கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் எலக்ட்ரான்களின் செறிவு கொடையணுவின் செறிவின் வர்க்க மூலத்திற்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.

(2) வெப்பநிலை அதிகரிக்க, பெர்மி ஆற்றல் மட்டம், கொடையணு ஆற்றல் நிலைக்கும் கீழாகக் குறைகின்றது. உயர்வெப்பநிலையில் தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் மையத்தை நெருங்கி, உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியாகி விடுகின்றது.

சுழிவெப்பநிலையில் பெர்மி ஆற்றல் மட்டம் மிகச்சரியாக, தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளியின் மையத்திலிருக்கின்றது. மின்னூர்திகளின் செறிவும் ஏறக்குறைய சுழியாக இருக்கின்றது. இது வரைபடம் 2.12ல்



படம் 2.12 log n_e Vs 1/T

A என்ற புள்ளியைக் குறிக்கின்றது. வெப்பநிலையை மெதுவாக அதிகரிக்கும் போது, கொடையணு அயனிக்கப்பட்டு எலக்ட்ரான் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குச் செல்கின்றது. அதனால் அப்பகுதியில் எலக்ட்ரான் செறிவு அதிகரிக்கின்றது. இது வேற்றணுக்களின் சேர்க்கையினால் ஏற்படுவதால் வேற்றணு நெடுக்கை என்பர். இதன் எல்லை B என்ற புள்ளியை எட்டும் மட்டும். அதன்பிறகு வெப்பநிலையை அறைவெப்பநிலை வரை அதிகரிக்க எல்லா கொடையணுக்களும் அயனிக்கப்படுகின்றன. கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் எலக்ட்ரான்களின் செறிவு அதிகரித்து ஒரு நிலைத்த நிலையை எட்டுகின்றது. வரைபடத்தில் ஊ என்ற புள்ளிவரை விரிந்திருக்கும் இதை முழுப்பயன் நெடுக்கை (exhaustion range) என்பர். இதற்கு மேலும் வெப்பநிலையை உயர்த்த, வெப்பக்கிளர்ச்சியால், சகப்பிணைப்பு முறிவு ஏற்பட்டு இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்கு எலக்ட்ரான்கள் செல்கின்றன. இந்நிலையில் கொடையணு ஆற்றல் நிலையிலுள்ள எல்லா எலக்ட்ரான்களும் முழுமையாகப் பயன்படுத்தப்பட்டுவிட்டதால், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து எலக்ட்ரான்கள் நேரடியாகக் கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்குச் செல்கின்றன. சமஅளவில் எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் அதிகரித்து, புறவியலான குறைக்கடத்தியை, உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியாக்குவதால், இப்பகுதியை உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி நெடுக்கை என்பர்.

சார்பிலாசுழி வெப்பநிலையில் மின்துளைகளின் செறிவு சுழியாக இருக்கும். வெப்பநிலை அதிகரிக்கும் போது முதலில் எலக்ட்ரான்கள்

கொடையணு ஆற்றல் நிலையிலிருந்து கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குச் செல்கின்றன. சற்று உயர்வெப்பநிலையில் சகப்பிணைப்பு முறிவால் எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் ஏற்பட்டு, எலக்ட்ரான்கள் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு எடுத்துச் செல்லப்பட, மின்துளை இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலேயே தங்குகின்றது. இதனால் எலக்ட்ரான் செறிவுக்கோடும், மின்துளை செறிவுக்கோடும், உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி நெடுக்கையில் ஒன்றோடொன்று மேற் பொருந்துகின்றன.

(4) கொடையணுவின் அயனியாக்க ஆற்றல்

சமன்பாடு (2.22)ஐ

$n_e = C\, e^{-\Delta E/2k_B T}$ எனக் குறிப்பிடலாம்.

இங்கு C என்பது ஒரு மாறிலியாகக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. மடக்கை எடுக்க

$$\log n_e = \log C - \Delta E/2k_B T$$

$\log n_e$ க்கும் 1/Tக்கும் ஒரு வரைபடம் வரைந்து, வரைகோட்டின் சரிவிலிருந்து $\Delta E/2k_B$ ன் மதிப்பை அறிந்து, அதிலிருந்து கொடையணுவின் அயனியாக்க ஆற்றலைக் கணக்கிட்டறியலாம்.

(5) மின்கடத்து திறன்

n-வகை குறைக்கடத்தியில், ஏற்பான்கள் சிறிதும் இல்லை என்பதால் $n_h = 0$

$\sigma = e n_e \mu$

n_e -ன் மதிப்பை சமன்பாடு (2.22) லிருந்து பெறலாம்.

2.7 p - வகைக் குறைக்கடத்தி

(1) மின்னூர்திகளின் செறிவு

தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள ஒரு சில எலக்ட்ரான்கள், தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள ஏற்பணுவின் ஆற்றல் நிலையில் இடம்பெறுவதால், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் மின்துளைகள் உருவாகின்றன. இம்மின் துளைகளின் அடர்த்தி (சமன்பாடு 2.8)

$$n_h = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} e^{(E_v-E_f)/k_BT}$$

என நாம் அறிவோம்.

(1) மின்னூர்திகளின் செறிவு

பெர்மி டிராக் கொள்கைப்படி, ஏற்பணுவின் ஆற்றல் நிலையில் இடம்பெறும் எலக்ட்ரான்களின் அடர்த்தி,

$$N(E_a)\, dE = D(E_a)\, F(E_a)\, dE$$

$$n_e = \frac{N_a}{e^{(E_a-E_f)/2k_BT} + 1}$$

$E_a - E_F > k_BT$ என்பதால் பின்னத்தில் கீழ்ப்பகுதியிலுள்ள 1ஐப் புறக்கணிக்கலாம்.

$$n_e = \frac{N_a}{e^{(E_a-E_f)/k_BT}} \qquad (2.23)$$

சமநிலையில், இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள மின்துளைகளின் செறிவு, ஏற்பணுவின் ஆற்றல் நிலையிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் செறிவிற்குச் சமம். எனவே,

$$N_c\, e^{(E_v-E_f)/k_BT} = N_a / e^{(E_a-E_f)/k_BT}$$

இருமருங்கும் மடக்கை எடுத்தால்

$$E_v - E_a - 2E_f = k_BT \log e\, (N_a/N_c)$$

அல்லது

$$E_f = \frac{E_v + E_a}{2} - \frac{k_BT}{2} \frac{N_a}{2\,(2\pi\, m_h^* k_BT/h^2)^{3/2}} \quad (2.24)$$

At oK, $E_f = E_v + E_a / 2$

இந்நிலையில் பெர்மி ஆற்றல் நிலையானது, இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் மேல் விளிம்பிற்கும், ஏற்பணு ஆற்றல் நிலைக்கும் சரியாக நடுவில் அமைகின்றது.

(2) மின்துளையின் செறிவிற்கும், ஏற்பணுவின் செறிவிற்கும் உள்ள தொடர்பு

சமன்பாடு (2.9)ல், (2.24)ஐக் கொண்டு E_F ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய,

$$n_h = N_c\, e^{[E_v-(E_v+E_a)/2\ -\ k_BT/2 \log (N_a/N_c)\ ]\ /\ k_BT}$$

$$= N_c\, e^{(E_v-E_a/2k_BT}\ .\ (N_a/N_c)^{1/2}$$

$$= (N_a\, N_c)^{1/2}\ e^{(E_v-E_a/2k_BT}$$

இதில், N_c -ன் மதிப்பை பதிலீடு செய்ய

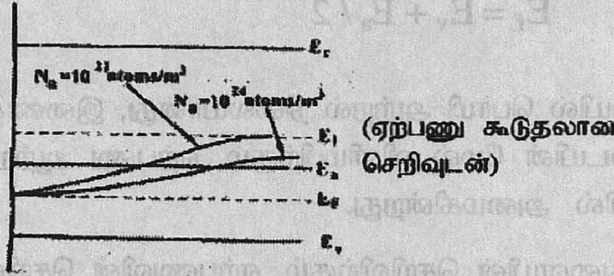
$$= (2N_a)^{1/2} \left(\frac{2\pi\, m_h^* k_BT}{h^2} \right)^{3/4} .\ e^{-\Delta E/2k_BT} \quad (2.25)$$

இதில் $\nabla E = E_a - E_v$ என்பது ஏற்பணுவின் அயனியாக்க ஆற்றலாகும்.

(1) இத்தொடர்பு இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டையில் மின்துளைகளின் செறிவு ஏற்பணுவின் செறிவின் வர்க்கமூலத்திற்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.

(2) உயர்வெப்பநிலையில், p-வகை குறைக்கடத்தி ஓர் உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி போலச் செயல்படுகின்றது.

(3) பெர்மி ஆற்றல் மட்டம், வெப்பநிலை அதிகரிக்க, தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்பட்டையின் மையத்தை நோக்கிச் செல்கின்றது.



படம் 2.13 வெப்பநிலை பொறுத்து பெர்மி ஆற்றல் நிலையில் ஏற்படும் மாற்றம் (P-வகை குறைக்கடத்தி)

(3) மின்கடத்து திறன்

p-வகை குறைக்கடத்திகளில் கொடுப்பான் ஏதுமில்லை என்பதால்

$n_e = 0$

எனவே மின்கடத்து திறன் $\sigma = |e|\, n_h\, \mu_h$

n_h-ன் மதிப்பைச் சமன்பாடு (2.9)லிருந்தும் (2.25) லிருந்தும் பெறலாம்.

2.8 மின்னூட்ட நடுநிலைச் சமன்பாடு

ஒரு புறவியலான குறைக்கடத்தியில் கொடையணு மற்றும் ஏற்பணுக்களால் ஆன இரு வேற்றுப் பொருளும் கலந்திருப்பதாகக் கொள்வோம். வெப்பநிலை அதிகரிக்கும்போது, கொடையணுவின் செறிவு N_d மற்றும் மின்துளைகளின் செறிவு n_h இவற்றின் கூடுதல், ஏற்பணுவின் செறிவு N_a மற்றும் எலக்ட்ரான்களின் செறிவு n_e இவற்றின் கூடுதலுக்குச் சமமாயிருக்கின்றது. அதாவது மின்னூட்டங்கள் சமப்படுத்தப்பட்டு நடுநிலையில் இருக்கின்றன. இதை

$$N_d + n_h = N_a + n_e \qquad (2.26)$$

எனக் குறிப்பிடலாம். இதை மின்னூட்ட நடுநிலைச் சமன்பாடு என்பர்.

எலக்ட்ரான் செறிவு அறிதல்

(2.26) லிருந்து $n_e = n_h + N_d - N_a$

$n_i^2 = n_e n_h$ என்பதால் $n_h = n_i^2 / n_e$ எனலாம்.

எனவே

$n_e = n_i^2 / n_e + N_d - N_a$

அல்லது $n_e^2 - n_e (N_d - N_a) - n_i^2 = 0$

இது ஓர் இருபடிச் சமன்பாடு. இதனிரு தீர்வுகள்

$$n_e = \frac{(N_d - N_a) \pm \sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2}}{2} \qquad (2.27)$$

மின்துளைச் செறிவை அறிதல்

$n_h = n_e + N_a - N_d$

$n_h = (n_i^2 / n_h) + N_a - N_d$

அல்லது $n_h^2 - n_h (N_a - N_d) - n_i^2 = 0$

இதன் தீர்வுகள்

$$n_h = \frac{(N_a - N_d) \pm \sqrt{(N_a - N_d)^2 + 4n_i^2}}{2} \qquad (2.28)$$

சிறப்பு நிலைகள்

(1) உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தி

உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் வேற்றணுக் கலப்பு இல்லை. எனவே $N_a = N_d = 0$

சமன்பாடு (2.26) லிருந்து $n_e = n_i$

இதுபோல சமன்பாடு (2.27)லிருந்தும் $n_h = n_i$ என்று நிறுவலாம்.

இவ்விரு தொடர்புகளையும் பெருக்க $n_i^2 = n_e n_h$ என்ற தொடர்பைப் பெறலாம்.

(2) புறவியலான குறைக்கடத்தி

(அ) n-வகைக் குறைக்கடத்தி

n-வகைக் குறைக்கடத்திகளில் கொடையணு இருக்க ஏற்பணு இருப்பதில்லை. எனவே $N_a=0$

(2.27) லிருந்து

$$n_e = \frac{N_d}{2} \pm \left(\frac{N_d^2}{4} + n_i^2\right)^{1/2}$$

விரி தொடராய்க் குறிப்பிட,

$$n_e = \frac{N_d}{2} \pm \frac{N_d}{2}\left(1 + \frac{4n_i^2}{2N_d^2} + \ldots\ldots\right)$$

அல்லது

$$n_e = N_d + \frac{n_i^2}{N_d} \qquad (2.29)$$

தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் $n_i \sim 0$. எனவே தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில், 0-வகை குறைக்கடத்தியில் எலக்ட்ரான் செறிவு, கொடையணுவின் செறிவிற்குச் சமமாக இருக்கும் எனலாம்.

(ஆ) p-வகை குறைக்கடத்தி

p-வகை குறைக்கடத்திகளில் ஏற்பணுக்கள் இருக்க, கொடையணு இருப்பதில்லை. எனவே $N_d=0$ எனலாம். சமன்பாடு (2.28)லிருந்து

$$n_h = \frac{N_a}{2} \pm \left(\frac{N_a^2}{4} + n_i^2\right)^{1/2}$$

விரி தொடராய்க் குறிப்பிட,

$$n_h = \frac{N_a}{2} \pm \frac{N_a}{2}\left(1 + \frac{4n_i^2}{2N_a^2} + \ldots\ldots\right)$$

அல்லது

$$n_e = n_h + \frac{n_i^2}{N_a} \qquad (2.30)$$

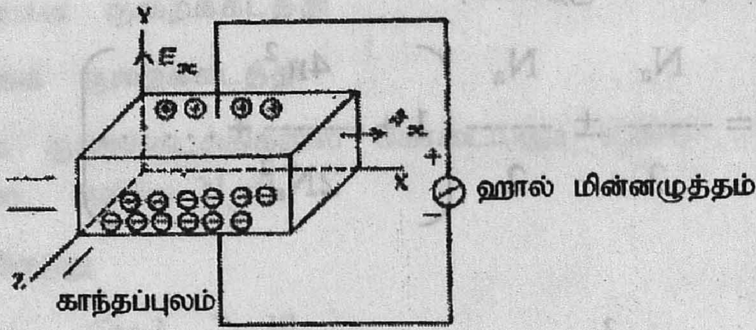
தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் $n_i=0$ என்பதால் $n_h = N_a$. எனவே தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் pவகை குறைக்கடத்தியில் மின்துளைகளின் செறிவு, ஏற்பணுவின் செறிவிற்குச் சமமாக இருக்கும் என்று கூறலாம்.

2.9 குறைக்கடத்திகளில் ஹால் விளைவு

அத்தியாயம் 6பகுதி1-ல் ஹால் விளைவு பற்றி ஓரளவு தெரிந்து கொண்டோம். மின்கடத்து திறனை மதிப்பிடுவதால், மின்கடத்தல் எலக்ட்ரானால் ஏற்படுகின்றதா, அல்லது மின்துளையால் ஏற்படுகின்றதா என்பதைத் தீர்மானிக்க முடியாது. அதனால் குறைக்கடத்தி n-வகையா அல்லது p-வகையா என்று கண்டுபிடிக்க முடியாது. ஆனால் ஹால் விளைவினால், இவற்றை வேறுபடுத்தி இனமறிய முடிவதுடன், மின்னூர்திகளின் நகர்திறனையும் மதிப்பிட்டறியலாம்.

n-வகைக் குறைக்கடத்தியில் ஹால் விளைவு

n-வகைக் குறைக்கடத்தியாலான பாளத்தில் ஒரு குறிப்பிட்ட அச்சு வழியாக (x-அச்சு என்போம்) மின்னோட்டத்தையும், அதற்குச் செங்குத்தாக ஒரு காந்தப்புலத்தையும் (z-அச்சு என்போம்) செயல்படுத்த, இவ்விரு அச்சுக்களுக்கும் செங்குத்தான திசையில் (y-அச்சு என்போம்). ஒரு மின்னழுத்தம் விளைகின்றது. இதையே ஹால் மின்னழுத்தம் என்பர்.



படம் 2.14 குறைக்கடத்தியில் ஹால் விளைவு

செயல்படும் புறமின்புலச் செறிவை E_x என்றும், புறகாந்தப்பாயச் செறிவை B_z என்றும் கொள்வோம். இதன்விளைவாக ஒரு மின்னோட்டச் செறிவு J_x, புறமின்புலம் செயல்படும் திசையில் ஏற்படும். -e என்ற மின்னூட்டம் கொண்ட எலக்ட்ரான்களால் மின்னோட்டம் நிகழ்வதாகக் கொண்டால், செயல்படுத்தப்படும் புறகாந்தப்புலம், குறுக்காய்ச் செயல்படும் காந்தவிலக்கு விசையை ஏற்படுத்தி, எலக்ட்ரான்களை குறைக்கடத்தியின் அடிப்பக்கப்பரப்பு நோக்கி நகரச் செய்யும். இதுபோல மின்துளைகள் இப்பரப்பிற்கு எதிர்பக்கம், அதாவது மேற்பக்கப்பரப்பு நோக்கி நகருமெனலாம். இப்படி சேகரிக்கப்படும் மின்னூட்டம், குறுக்காய் செயல்படும் ஒரு மின்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றது. அதன் புலச்செறிவை E_y என்போம். இதுவே ஹால் மின்புலம் எனப்படுகின்றது. இது குறுக்காய் நகரும் எலக்ட்ரான்களின் குறுக்கு இயக்கத்தை எதிர்க்கின்றது. இதன் விளைவாக ஒரு சமநிலை தோற்றுவிக்கப்படுகின்றது. இந்நிலையில், சேகரிக்கப்பட்ட எலக்ட்ரான்களால் ஏற்படும் விசை, காந்த விசைக்குச் சமமாகின்றது. எலக்ட்ரான் மீது செயல்படும் மொத்தவிசை சுழியாவதால், மேலும் குறுக்காய் நகர்தல் தடுத்து நிறுத்தப்படுகின்றது.

$$eE_y = B_z e v_x$$

$E_y = E_H$ (ஹால் மின்னழுத்தம்) என்பதால்

$$E_H = B_z v_x$$

எலக்ட்ரானின் நகர்வு வேகம் v_x, அதன் மின்னோட்டச் செறிவுடன் தொடர்புடையது.

$$J_x = -n_e e v_x$$

அல்லது $v_x = - J_x / n_e e = R_H J_x$

$E_H = R_H J_x B_z$

இதில் $R_H J_x = -1 / n|e|$ என்பது குறைக்கடத்தியின் ஹால் குணகமாகும். எலக்ட்ரான்களுக்கு இக்குணகம் எதிர் குறியுடையதாகவும், மின்துளைகளுக்கு நேர்குறியுடையதாகவும் இருக்கின்றது.

p-வகைக் குறைக்கடத்தியில் ஹால் விளைவு

இதில் மின்துளைகளின் இயக்கத்தில் மின்னோட்டம் நிகழ்கின்றது. அதன்மீது செயல்படும் குறுக்கு மின்புல விசை அல்லது ஹால் மின்னழுத்த விசை, காந்த விசைக்குச் சமம் என்பதால்,

$E_H = B_z v_x$

$J_x = n_h e v_x$

அல்லது $v_x = J_x / n_h e = R_H J_x$

$E_H = R_H J_x B_z$

இங்கு $R_H = 1/ n_h e$ எனவே ஹால் குணகம் நேர்குறியுடைய மதிப்புடையதா, அல்லது எதிர்குறியுடைய மதிப்புடையதா என்பதைக் கொண்டு அது p வகை அல்லது n வகைக் குறைக்கடத்தி என அறியலாம்.

வினாக்களும் பயிற்சிக் கணக்குகளும்

1. ஆற்றல் இடைவெளியின் அடிப்படையில் திண்மப் பொருட்களை வகைப்படுத்தி விளக்குக.
2. குறைக்கடத்தியின் சிறப்பியல்புகள் யாவை?
3. உள்ளார்ந்த, புறவியலான குறைக்கடத்தி என்றால் என்ன?
4. உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் மின்கடத்துதிறனுக்கும் மின்னூர்திகளின் நகர்திறனுக்குமான தொடர்பு யாது?
5. உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் சார்பிலா சுழிவெப்பநிலையில் பெர்மி ஆற்றலானது தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையின் நடுவில் இருக்கின்றது எனக் காட்டுக.

6. உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியில் கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டையில் எலக்ட்ரான்களின் செறிவு மற்றும் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையில் மின்துளைகளின் செறிவுக்கான தொடர்புகளைப் பெறுக.

7. ஆற்றல் இடைவெளியின் அடிப்படையில், உள்ளார்ந்த குறைக்கடத்தியிலிருக்கும் மின்னூர்திகளின் செறிவுக்கான சமன்பாட்டை நிறுவுக.

8. நிறைத்தாக்க விதியைக் கூறி விளக்குக.

9. பெர்மி ஆற்றல் நிலை, n-வகை குறைக்கடத்தியில் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குக் கீழ்விளிம்பிற்கும் p வகை குறைக்கடத்தியில் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு மேல்விளிம்பிற்கும் அருகாமையிலிருக்கின்றது என நிறுவுக.

10. n -வகை குறைக்கடத்தியில் மின்னூர்திகளின் செறிவை மதிப்பிட்டு, வெப்பநிலை பொருத்த பெர்மி ஆற்றல் நிலையில் ஏற்படும் மாற்றத்தை விவரி.

11. n -வகை குறைக்கடத்தியில் கடத்து எலக்ட்ரான் செறிவிற்கும் கொடையணுவின் செறிவிற்கும் உள்ள தொடர்பை நிறுவி விவரி.

12. கொடையணுவின் அயனியாக்க ஆற்றலை எங்ஙனம் கண்டறிவாய்?

13. n -வகை குறைக்கடத்தியில் மின்னூர்திகளின் செறிவிற்கான சமன்பாட்டை வருவி. அதைப் பயன்படுத்தி மின்துளையின் செறிவிற்கும், ஏற்பணுவின் செறிவிற்கும் உள்ள தொடர்பை நிறுவுக.

14. மின்னூட்ட நடுநிலைச் சமன்பாட்டை வரையறு. அதன்மூலம் எலக்ட்ரான் மற்றும் மின்துளைகளின் செறிவிற்கான தொடர்பைப் பெற்று உள்ளார்ந்த மற்றும் புறவியலான குறைக்கடத்திகளை சிறப்பு நிலைகளாக விளக்குக.

15. n-வகை மற்றும் வகை குறைக்கடத்திகளில் ஹால் விளைவை விவரி. மின்னூர்திகளின் இரு ஆற்றல் பட்டை மாதிரியின் அடிப்படையில் ஒரு குறைக்கடத்தியின் ஹால் குணகத்திற்கான கோவையைப் பெறுக.

3. பொருட்களின் காந்தப் பண்புகள்

காந்தப் பொருட்களின் வகைகள் - காந்தமூலங்கள் - லாஞ்செவின் டயா காந்தக் கொள்கை - குவாண்டம் கொள்கை - லாஞ்செவின் பாரா காந்தக் கொள்கை - வெயிஸ் கொள்கை - குவாண்டம் கொள்கை - செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் - கோணஉந்தம் தணிக்கை - பாராகாந்தக் குளிர்வூட்டல் கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் பாரா காந்தத் தன்மை.

வெயிஸ் பெரோ காந்தக் கொள்கை - குவாண்டம் கொள்கை - ஹைசன்பெர்க் பெரோ காந்தக் கொள்கை - மாக்னான் - ப்ளாக் விதி - பெரோ காந்த வயல்கள் - ப்ளாக் சுவர்.

எதிர்பெரோ காந்தப் பண்பு - மூலக்கூறு புலக் கொள்கை

பெரிகாந்தமும் பெரரெட்டுகளும் - மூலக்கூறு புலக் கொள்கை

பொருட்களின் காந்த ஏற்புத்திறன் அறியும் சோதனை முறைகள் - காய் திராசு - கியூரி வழிமுறை - படிகங்களின் திசையொவ்வாக் காந்தப் பண்பை அளவிடுதல் - ராபி வழிமுறை - கிருஷ்ணன் அலைவு வழிமுறை - கிருஷ்ணன் மாறுநிலை முறுக்கு முறை

பயிற்சிக் கணக்குகள் - வினாக்களும் கணக்குகளும்

3. பொருட்களின் காந்தப் பண்பு

3.1 அறிமுகம்

திசை காட்டும் கருவிகளில், காந்த ஊசியாக மட்டும் பயன்படுத்தப்பட்டு வந்த நிலை மாறி, இன்றைக்குக் காந்தத்தின் பயன்பாடு பல்வேறு அறிவியல் துறைகளிலும் விரிவடைந்து வருகின்றது. அடிப்படையான இயற்கை விசையின் ஒரு மூலமாக இருப்பதால் தொழில்நுட்பத்துறை சார்ந்த பல கருவிகளிலும், சாதனங்களிலும் காந்தம் முக்கியப் பங்கேற்றுள்ளது. விசை-வகை மாற்றியாகத் தொலைபேசி, ஒலிபெருக்கி, நாடாக்களில் ஒளி மற்றும் ஒலிப்பதிவு செய்யும் பெட்டகம் மின் உற்பத்தி செய்யும் டைனமோ மற்றும் கணினியின் நினைவகங்களில் காந்தத்தின் பயன்பாடு விரிவடைந்துள்ளது.

காந்தப்புலத்தில் மின்ம நிலையிலுள்ள பாய்மங்களின் இயக்கத்தினால் மின்னாற்றலை உற்பத்தி செய்யமுடியும் என்ற புதிய வழிமுறைகளைக் காட்டியிருப்பதும் இந்தக் காந்தங்களே. இதனால் ஆற்றல் தட்டுப்பாட்டிற்கு ஒரு தீர்வு கிடைத்துள்ளது.

நுண்துகள்கள் மற்றும் அணுக்கதிர் வீச்சுகளை ஆராய உதவும் ஆய்கருவிகள், அடிப்படைத்துகள்களின் வேகத்தை அதிகரித்து முடுக்கி விடக்கூடிய துகள்முடுக்கும் பொறிகள், நுண்ணிய மூலக்கூறுகளையும் பார்க்கக்கூடிய எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி, அணு மற்றும் மூலக்கூறுகளின் கட்டமைப்புகளை அறிய உதவும் அணுக்கரு காந்த ஒத்ததிர்வு நிறமாலைமானி போன்ற பல புதுமைக் கருவிகளை அணுவியல் துறைக்குக் காந்தம் வழங்கியுள்ளது.

உண்மையில் காந்தம் இப்பிரபஞ்சம் எங்கும் நிறைந்திருக்கின்றது. அணுவின் கட்டமைப்பிற்குக் காரணமான அடிப்படைத் துகள்களானாலும், அண்டவெளியில் எங்கும் இயங்கிக் கொண்டேயிருக்கும் விண்ணுறுப்புகளானாலும் அவற்றோடு ஒரு காந்தப்புலம் உள்ளார்ந்த தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது. இது அவற்றின் காந்தத்தன்மையை எடுத்துக்காட்டுவதாக இருக்கின்றது. நுண்பொருள் உலகில் அடிப்படைத் துகள்களையும், பேரியல் உலகில் விண்ணுறுப்புகளையும் ஆராயப் பொருட்களின் காந்தப்

பண்பு பற்றிய அறிவு தேவையாக இருக்கின்றது. காந்தம், அறிவியல் மற்றும் தொழில்நுட்பத் துறையில் பல புதிய பரிமாணங்களுக்குக் காரணமாக இருப்பதால், பொருட்களின் காந்தப் பண்பை ஓரளவு விரிவாகத் தெரிந்து கொள்வோம்.

3.2 காந்தப்பொருட்களின் வகைகள்

பொதுவாக இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் ஆகியவை மட்டுமே காந்தத் தன்மை கொண்டுள்ளன என்று நினைக்கிறோம். ஆனால் உண்மையில் எல்லாப் பொருட்களுமே காந்தத் தன்மை கொண்டுள்ளன. இவற்றுள் இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கலுக்கு அத்தன்மை மிக அதிகமாக இருக்கின்றது. பொருட்களின் காந்தத் தன்மையின் அளவும், வெப்பநிலை மற்றும் புறக்காந்தப்புலச் செறிவுடன் தொடர்புடைய அதன் சார்பும் பொருளுக்குப் பொருள் வேறுபட்டதாய் இருக்கின்றன. இதன்படிப் பொருட்களை மூன்று பெரும் பிரிவுகளாகப் பிரிக்கலாம். அவை

1. டயா காந்தம்
2. பாரா காந்தம்
3. பெரோ காந்தம்

எனப்படும். பெரோ காந்தத்திலிருந்து சற்று மாறுபட்ட பெரிகாந்தம், எதிர்பெரோ காந்தம் இவற்றையும் கருத்திற் கொண்டால் காந்தப் பண்பால் பொருட்களை ஐந்து வகைப்படுத்தலாம்.

3.3 காந்த மூலங்கள்

பொருட்களுக்கு காந்தத் தன்மை ஏன் ஏற்படுகின்றது? ஓர் அணு, அதன் சிறப்பியல்புடைய சிலவகை இயக்கங்களினால் ஏற்படுத்தும் காந்தப்புலத்தால் தெளிவாக்கிக் கொள்ள முடியும். ஓர் அணு மூன்று காரணங்களினால் காந்தத்தன்மை பெற்றிருக்க இயலும். அவை, அணுக்கருவைச் சுற்றி வரும் எலக்ட்ரான்களின் சுற்றுப்பாதை இயக்கம், எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சி இயக்கம் மற்றும் அணுக்கருவின் தற்சுழற்சி இயக்கம் ஆகும்.

எலக்ட்ரான் எதிர்மின்னூட்டங் கொண்ட ஒரு துகள். எனவே எலக்ட்ரான் ஒரு குறிப்பிட்ட சுற்றுப்பாதையில் மிக விரைவாகச் சுற்றி வரும்போது, அதை ஒரு வட்டக்கம்பி வழிச் செல்லும்

மின்னோட்டமாகக் கருதலாம். இம்மின்னோட்டம், சுற்றுப்பாதைத் தளத்திற்குச் செங்குத்தாக ஒரு காந்தப்புலத்தை ஏற்படுத்தும் என நாம் அறிவோம். இது பொருளுக்கு டயா காந்தத் தன்மையை வழங்குகின்றது. எல்லா வகையான அணுக்களும் ஒன்று அல்லது அதற்கும் மேற்பட்ட சுற்றியக்க எலக்ட்ரான்களைப் பெற்றிருப்பதால், எல்லாப் பொருட்களும் டயா காந்தப் பண்பைக் கொண்டிருக்குமெனலாம். எனவே பிற காந்தப் பண்புகள், டயா காந்தப் பண்போடு மேற்பொருந்தியிருக்கின்றன.

எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி என்பது ஒரு குறுகிய வட்டப்பாதையில் இயங்கும் மின்னூட்டமே. எனவே எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சியும், அச்சுக்கு இணையாக ஒரு காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றது எனலாம். இதனால் இணையற்றுத் தனித்த (unpaired) எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள அணுக்கள் பாரா காந்தத் தன்மையை வெளிப்படுத்துகின்றன.

பொதுவாகப் பொருட்களில் ஒன்றுக்கு மேற்பட்ட காந்தமூலங்கள் நெருக்கமாக அமைந்துள்ளன. படிகத்தில் வெவ்வேறு அமைவிடங்களில் படிந்திருக்கும் காந்தத் தன்மை கொண்ட அயனிகள், படிகத்தளத்தில் அதன் அமைவிடத்திற்கு ஏற்ப வெவ்வேறுவிதமாக இடைவினை புரிகின்றன. அருகருகேயுள்ள இரு காந்த அயனிகளுக்கிடையிலான இடையீட்டுச் செயல், படிகத்தளத்தையும், அகக் காந்தப் புலத்தையும் தீர்மானிக்கின்றது. செறிவுமிக்க இந்த அகக்காந்தப்புலம் புறத்தூண்டுதல் ஏதுமின்றிப் பொருளைக் காந்தமாக்கம் செய்கின்றது. அதனால் தற்பிறப்பாகக் காந்தமாக்கம் செய்யப்பட்ட சிறு சிறு பகுதிகள் தோன்ற, பெரோ காந்தத்தன்மை ஏற்படுகின்றது. பெரோ காந்தம், தனிம அணுக்களில் முழுமை பெறாத அகக் கூடுகளில் உள்ள தனித்த எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சியால் விளைகின்றது. படிகத்தளத்தில் எல்லா காந்தமூலங்களும் ஒரே திசையில் முனைவாக்கம் பெற்று இணையாக இருக்கும்போது ஏற்படும் வலிமையான பரிமாற்று வினையால் ஏற்படுவது பெரோ காந்தம். இடைவினையின் வலிமைக்குறைவால், அடுத்தடுத்த அணித்தளங்களில் காந்த முனைவாக்கம் எதிர் எதிராகவும், சமமாகவும் இருந்தால் எதிர்பெரோ காந்தத் தன்மையும், எதிர் எதிராகவும் ஆனால் சமமின்றியும் இருந்தால் பெரிகாந்தத் தன்மையும் விளைகின்றன.

நுண்பொருள் உலகில் ஓர் அடிப்படைத் துகள் தனித்திருந்தாலும், அல்லது பிற துகள்களோடு பிணைவுற்றிருந்தாலும் தன் தற்சுழற்சியை இழப்பதில்லை. இது அணுக்கருவில் கட்டுண்டிருக்கும் புரோட்டானுக்கும், நியூட்ரானுக்கும் பொருந்தும். அணுக்கருவின் கட்டுமானத்தில் உள்ள புரோட்டான் மற்றும் நியூட்ரான்களின் தற்சுழற்சிகளின் கூடுதல் அந்த அணுக்கருவின் தற்சுழற்சியாகும். அணுக்கருவின் தற்சுழற்சி, அணுக்கருவின் காந்தத்தன்மைக்குக் காரணமாகின்றது. பொருட்களின் காந்தப் பண்புக்கு, அணுக்கருத் தற்சுழற்சியின் பங்களிப்பு, எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதை இயக்கம், தற்சுழற்சி போன்ற பிற காரணிகளோடு ஒப்பிட மிகவும் புறக்கணிக்கக் கூடியதாக இருக்கின்றது.

சொற்பொருள் விளக்கம்

காந்தத் திருப்பு திறன் (M)

புறகாந்தப் புலத்தில் வைக்கப்படும் ஒரு பொருள் எந்த அளவிற்குக் காந்தமாக்கப்படுகின்றது என்பதை காந்தத் திருப்புத்திறனால் (magnetic moment) அளவிட்டறிவார்கள். ஒரு காந்தத்தின் காந்தத் திருப்புத்திறன் அதிகமாக இருந்தால், புறக்காந்தப் புலத்தில் அது விரைவாகச் சுழன்று புலத்திற்கு இணையாகத் தன்னை இருத்திக் கொள்ளும். எனவே சீரான காந்தப் புலத்திற்குச் செங்குத்தாக ஒரு காந்தம் இருக்கும்போது அதன்மீது செயல்படும் திருப்பு இரட்டை (couple) அதன் காந்தத் திருப்புத் திறனாகும். இதை M என்று குறிப்பிடுவோம்.

காந்தமாக்கச் செறிவு (I)

ஓரலகு பருமனுள்ள பொருள் காந்தமாக்கப்பட்டு, பெறும் மொத்தக் காந்தத் திருப்புத்திறன் காந்தமாக்கச் செறிவாகும் (Intensity of mgnetisation). இதை (I) என்ற எழுத்தால் குறிப்பிடுவோம்.

$$I = \frac{M}{V}; \quad V - \text{பருமன்}$$

காந்த ஏற்புத்திறன் (χ)

காந்தமாக்கச் செறிவு, புறக்காந்தப் புலத்தின் வலிமை அதிகரிக்க, அதிகரிக்கின்றது. எனவே

$$I \,\alpha\, H = \chi H$$

அல்லது

$$\chi = \frac{I}{H} = \frac{\mu_0 I}{B}$$

இதில் B என்பது காந்தப் பாயச் செறிவு ; μ_0 வெற்றிடத்தில் காந்த உட்புகுதிறனாகும். இது ஓரலகுப் பருமனுக்குரிய காந்த ஏற்புத்திறன் (magnetic susceptibility) என்பதால் இதை $\chi_{பருமன்}$ என்று குறிப்பிடுவர்.

ஓரலகு நிறைக்குரிய காந்த ஏற்புத்திறனாலும் பொருட்களின் காந்தப்பண்பை வரையறுப்பார்கள். பொருளின் அடர்த்தி ρ எனில்

$$\chi_{நிறை} = \chi_{பருமன்} / \rho$$

ஒரு பொருளின் காந்தத் தன்மையை, அது பெற்றிருக்கின்ற χ-ன் மதிப்பு மற்றும் அதன் வெப்பநிலைச் சார்பு இவற்றைக் கொண்டும் வகைப்படுத்தலாம். காந்தப் பண்புகளின் ஒப்பீடு அட்டவணை 3.1ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை 3.1

காந்தப்பண்பு	காந்த ஏற்புத்திறன் (χ)	வெப்பநிலைச் சார்பு	எடுத்துக்காட்டுகள்
டையா	சிறிய அளவு, எதிர்குறி இயல்பானது	சார்பற்றது	உயிரியல் பொருட்கள் மந்த வளிமங்கள்
	இடையளவு, எதிர்குறி	தாழ்ந்த வெப்பநிலையில்20K வெப்பநிலைக்குக்கீழ் புலச் செறிவிற்கு ஏற்ப மாறுபடுகின்றது.	காரமண் உலோகங்கள் பிஸ்மத்
	உயரளவு, எதிர்குறி	ஒரு மாறுநிலை வெப்பநிலைக்குக் கீழ் தோன்றுகின்றது. இவ்வெப்பநிலையில் χ-ன் அளவு பெருமாற்றத்திற்கு உள்ளாகின்றது.	மீக்கடத்திகள்
பாரா	சிறிய அளவு, நேர்குறி (பௌலி பாரா காந்தம்)	சார்பற்றது	கார உலோகங்கள் இடைநிலைத்தனிம உலோகங்கள்
	உயரளவு, நேர்குறி	கியூரி வெப்பநிலை, $T<\theta$ டயாகாந்தமாக மாறிவிடுகின்றது.	அருமண் தனிம உலோகங்கள்
பெரோ	மிகையளவு, நேர்குறி	$\chi=C/T-\theta$. $T>\theta$ பாராகாந்தப்பகுதி $T<\theta$பெரோகாந்தப்பகுதி χ, வெப்ப நிலையோடும், புறகாந்தப் புலச்செறிவோடும் சிக்கலான தொடர்புடையது.	இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல், சில இடைநிலைத் தனிம, அருமண் உலோகங்கள்
எதிர்பெரோ	சிறிய அளவு, நேர்குறி	$\chi=C/T+\theta$. $T>T_N$ $\chi \propto T$, $T< T_N$ T_N – நீல் வெப்பநிலை	இடைநிலைத் தனிம உப்புகள்
பெரி	மிகையளவு, நேர்குறி	$\chi=C/T\pm\theta$. $T>T_N$ χ – சிக்கலமைப்பு	பெரைட்டுகள்

3.4 எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதை இயக்கத்தினால் விளையும் காந்தத்தன்மை

நேர் மின்னூட்டங் கொண்ட அணுக்கருவைச் சுற்றி வலம் வரும் எதிர்மின்னூட்டங் கொண்ட ஓர் எலக்ட்ரானைக் கருதுவோம். r என்ற ஆரமுடைய வட்டப்பாதையில் -e என்ற மின்னூட்டங் கொண்ட எலக்ட்ரான் v என்ற மாறாத வேகத்தில் செல்வதாகக் கொள்வோம். ஒரு வினாடியில் எலக்ட்ரான் v/2 πr முறை வலம் வருவதால், எலக்ட்ரான் இயக்கத்தால் விளையும் மின்னோட்டம் (i)

$$i = -e \frac{v}{2\pi r}$$

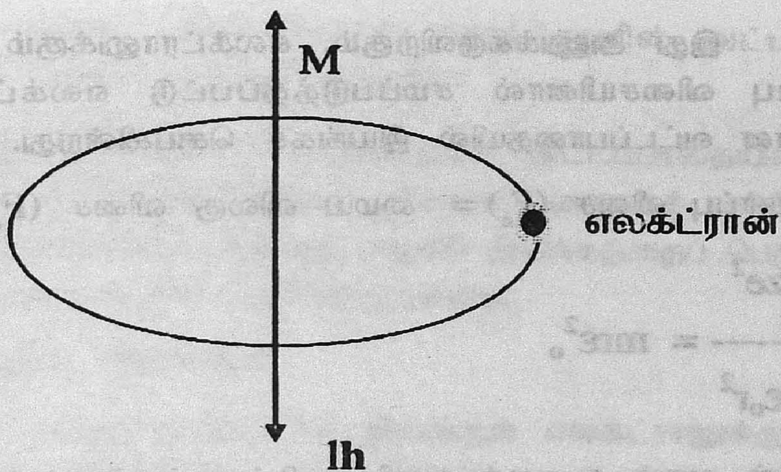
மின்காந்தவியலில் ஆம்பியர் கொள்கைப்படி இதை ஒரு காந்தக் கூடாகக் (magnetic shell) கருதலாம். இதன் காந்தத் திருப்புத்திறன், மின்னோட்டம் மற்றும் எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் பரப்பு இவற்றின் பெருக்கல் பலன் என்பதால்,

$$M = i.\pi r^2 = \frac{e}{2m}. mvr$$

mvr என்பது எலக்ட்ரானின் கோணஉந்தம். குவாண்ட இயக்கக் கொள்கைப்படி இது lħ என்றிருக்க வேண்டும். இதில் l என்பது எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதை கோண உந்த குவாண்ட எண்ணாகும். இதன் மதிப்பு 0>1>2>3>4>... என இருக்கலாம். ħ என்பது சுருக்கப் பெற்ற பிளாங் மாறிலியாகும். (ħ = h/2π)

$$M = -\left(\frac{e\hbar}{2m}\right) l \qquad (3.1)$$

இதில் வரும் எதிர்குறியானது, வட்டப்பாதையில் சுற்றிவரும் எலக்ட்ரான்களுக்குக் கோண உந்தமும், காந்தத் திருப்புத்திறனும் ஒன்றுக்கொன்று நேர்எதிராகச் செயல்படுகின்றன என்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.



படம் 3.1 சுற்றியங்கும் எலக்ட்ரானின் கோணஉந்தமும், காந்தத் திருப்புத் திறனும்.

l=1 எனில் அது அணுவில் 'p' எலக்ட்ரானைக் குறிக்கும். அதன் காந்தத்திருப்புத் திறன் - (eh/2m) ஆகும். இதைக் காந்தத் திருப்பு திறனின் ஓர் அலகாகக் கொண்டு, அதை போர் மாக்னெட்டான் (Bohr magneton) என அழைக்கின்றார்கள். M_B என்று குறிப்பிடுகின்றார்கள்.

காந்தத் திருப்புத்திறன் துகளின் நிறைக்கு எதிர்விகிதத்தில் இருப்பதால் நிறைமிக்க புரோட்டானின் காந்தத் திருப்புத்திறன் நிறை தாழ்ந்த எலக்ட்ரானோடு ஒப்பிட மிகவும் குறைவானது. இதனால் அணுக்கருவின் தற்சுழற்சியால் ஏற்படும் காந்தத்தன்மையை, எலக்ட்ரானின் இயக்கத்தால் ஏற்படும் காந்தத்தன்மையோடு ஒப்பிட்டால் புறக்கணிக்கத்தக்கது.

3.5 டயா காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான லாஞ்செவின் பழங்கொள்கை

ஓர் அணுவில் ze மின்னூட்டம் கொண்ட அணுக்கருவையும், r என்ற ஆரமுடைய வட்டப்பாதையில் (ω) என்ற கோணத்திசை வேகத்துடன் இயங்கும் ஓர் எலக்ட்ரானையும் கருதுவோம். வட்டப்பாதை இயக்கத்தினால் எலக்ட்ரான்மீது மையவிலகு விசை

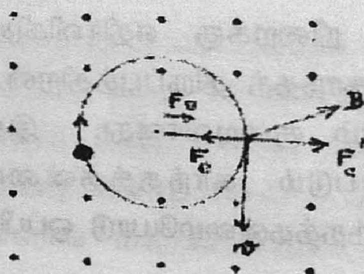
ஏற்படும். இது அணுக்கருவிற்கும், எலக்ட்ரானுக்கும் இடைப்பட்ட மின்ஈர்ப்பு விசையினால் சமப்படுத்தப்பட்டு எலக்ட்ரானை ஒரு நிலையான வட்டப்பாதையில் இயங்கச் செய்கின்றது.

மின்ஈர்ப்பு விசை (F_e) = மைய விலகு விசை (F_c)

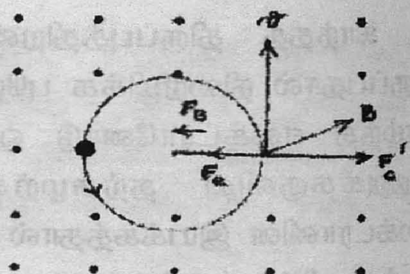
$$\frac{ze^2}{4\pi\varepsilon_o r^2} = mr\varepsilon^2{}_o \qquad (3.2)$$

இதில் வரும் e எலக்ட்ரானின் மின்னூட்டத்தையும், m அதன் நிறையையும் ε_o வெற்றிடத்தில் விசைக் கோடுகள் ஊடுருவுந்திறனையும் குறிப்பிடுகின்றன.

இனி B என்ற காந்தப்பாயச் செறிவுடைய ஒரு புறகாந்தப் புலத்தில், புலத்திற்குச் செங்குத்தாக எலக்ட்ரானின் இயக்கத்தளம் இருக்குமாறு அந்த அணு அமைப்பை வைப்போம். அப்போது இயங்கும் எலக்ட்ரான்மீது ஒரு காந்தவிசை அதன் ஆரவழியாகச் செயல்படுகின்றது. இதன் மதிப்பு Bev ஆகும்.



(அ) இடஞ்சுழி



(ஆ) வலஞ்சுழி

படம் 3.2a புறக்காந்தப்புலத்தில் அணுவின் வட்டச்சுற்று எலக்ட்ரான் (காந்தப்புலம் இயக்கத்தளத்திற்குச் செங்குத்தாய் உள்ளது)

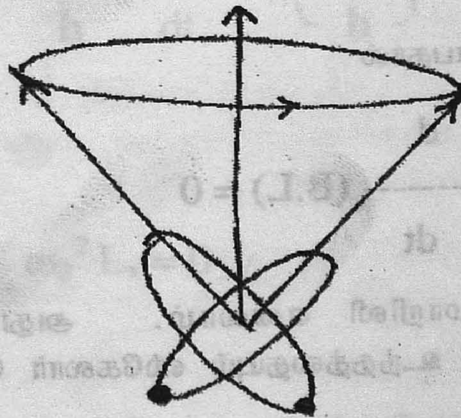
இதில் v என்பது எலக்ட்ரானின் நேர்கோட்டுத் திசைவேகமாகும். பிளமிங்கின் வலக்கை விதிமூலம் இந்தக் காந்த விசை (F_B) செயல்படும் திசையை அறிந்து கொள்ளலாம்.

இந்தக் காந்த விசையினால் எலக்ட்ரானின் வட்டப்பாதை இயக்கத்தில் என்ன மாற்றம் ஏற்படும்?

இக்காந்த விசையினால் எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் ஆரம் மாற்றத்திற்கு உள்ளாவதில்லை என்றும், மாறாகக் காந்தப்புலம் செயல்படும் திசையைப் பற்றி ஒரு சுழற்சி இயக்கத்தைப் பெறுகின்றது என்றும் லார்மர் என்பார் தெரிவித்துள்ளார்.

லார்மர் சுழற்சி இயக்கம்

அணுவில் சுற்றுப்பாதையில் இயங்கும் எலக்ட்ரானுக்கு, அதன் பொருட்டு காந்தத்திருப்புத் திறன் ஏற்படுவதால், அது தோற்றுவிக்கப்படும் புறகாந்தப்புலத்தோடு இடையீட்டுச் செயலை ஏற்படுத்துகின்றது. அப்போது கற்பனையான அணுக்காந்தமானது, காந்தஊசிபோலப் புறகாந்தப்புலத்திற்கு இணையாக எப்போதும் திசை திரும்புவதில்லை. இது நுண்பொருள் உலகில் காணப்படுகின்ற மற்றொரு முக்கியமான வேறுபாடாகும். புறகாந்தப்புலத்தில் எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதை இயக்கத்தைக் குறிப்பிடும் கோணஉந்த வெக்டாரானது காந்தப்புல அச்சைப் பற்றி வலம் வருகின்றது. இஃது பம்பரம் சுழலும்போது அதன் அச்சு, புவிஈர்ப்பு விசை செயல்படும் நேர்குத்தான அச்சைத் தற்சுழற்சியோடு சுற்றி வருவதை ஒத்திருக்கின்றது. எலக்ட்ரானின் இத்தகைய இயக்கத்தை லார்மர் சுழற்சி இயக்கம் (Larmor precessional motion) என்கிறார்கள்.



படம் 3.2டி லார்மர் சுழற்சி இயக்கம்

எலக்ட்ரானின் கோண உந்தத்திற்கும், காந்தத் திருப்புத்திறனுக்கும் உள்ள தொடர்பு $M = -(e/2m) L$ என அறிவோம். புறகாந்தப்புலத்தில் அணுக்காந்தத்தின் மீது ஒரு சுழற்சி விசை தூண்டப்படுகின்றது. இதன் மதிப்பு கோணஉந்தத்தின் மாறுபடுவீதமாகும்.

$$\frac{dL}{dt} = M \times B$$

$$= -\frac{e}{2m} L \times B = \frac{-\mu_B L}{h} \times B$$

μ_B என்பது போர் மாக்னெட்டான் என்ற அணுவியல் காந்தத் திருப்புத்திறனின் அலகாகும்.

சுழற்சி விசையைக் காந்தப்பாயச் செறிவுடன் ஸ்கேலார் பெருக்கல் செய்ய

$$B.\frac{dL}{dt} = -\frac{\mu_B}{h} (L \times B).B = 0$$

மாறாதது என்பதால்

$$B.\frac{dL}{dt} = -\frac{d}{dt} (B.L) = 0$$

அல்லது B.L-மாறிலி எனலாம். அதுபோலச் சுழற்சி விசையையும் கோண உந்தத்தையும் ஸ்கேலார் பெருக்கல் செய்ய

$$L.\frac{dL}{dt} = 0$$

அல்லது L^2 - மாறிலி

இவ்விரு முடிவுகளும் L^2-ம் மற்றும் காந்தப்புலத் திசையில் கோணஉந்தத்தின் கூறும் மாறாதிருக்கின்றன எனத் தெரிவிக்கின்றன. இதனடிப்படையில் நாம் லார்மர் அதிர்வெண்ணை வருவிக்கமுடியும்.

காந்தப்புலம் z-அச்சு வழிச் செயல்படுவதாகக் கொண்டால் L_z மற்றும் $L_x^2+L_y^2=(L-L_z^2)$ மாறிலியாகும்.

$$B = Bk$$

என்பதால்

$$\frac{dL_x}{dt} = -\frac{\mu_B}{h} BL_y$$

$$\frac{dL_y}{dt} = +\frac{\mu_B}{h} BL_x$$

இவற்றை மேலும் பகுத்தலுக்கு உட்படுத்தினால்

$$\frac{d^2L_x}{dt^2} = -\frac{\mu_B B}{h}\frac{dL_y}{dt} = -\left(\frac{\mu_B B}{h}\right)^2 L_x$$

அல்லது

$$\frac{d^2L_x}{dt^2} + \omega_B^2 L_x = 0$$

இது சீரிசை அலைவியக்கச் சமன்பாடு என்பதால், $\omega_B=\mu_B B/h$ என்பது லார்மர் அதிர்வெண் எனப்படும்.

லார்மர் சுழற்சி இயக்கத்தினால் ஏற்படும் சுழற்சிவேகம்,

எலக்ட்ரானின் கோணத்திசை வேகத்தை மாறுதலுக்கு உட்படுத்துகின்றது. $d\omega$ என்பது கோணத்திசை வேகத்தில் ஏற்படும் மாற்றம் என்போம்.

எலக்ட்ரானின் இடஞ்சுழி இயக்கத்தில் (படம் 3.2அ) வட்டப்பாதையின் நிலைப்புத் தன்மைக்கு, மைய விலகு விசை ($F'c=mr\omega^2$) செயல்படும் விளைவு மைய நோக்கு விசைக்குச் சமமாக இருக்க வேண்டும்.

$$F_E - F_B = F_c'$$

$$mr\omega_o^2 - Ber\omega = mr\omega^2$$

$\omega = \omega_o + d\omega$ எனக் கொண்டால்

$$d\omega = -\frac{Be}{2m} \qquad (3.3)$$

இதைப்போல வலஞ்சுழி இயக்கத்தில் வட்டப்பாதையின் நிலைப்புத்தன்மைக்கு

$$d\omega = \frac{Be}{2m}$$

என்று காட்டலாம். புறக்காந்தப்புலத்தால் வட்டஇயக்க எலக்ட்ரானின் கோணத்திசை வேகம் Be/2m அளவு மாறுபடுகின்றது என்பதை இது தெரிவிக்கின்றது.

இதனால் அதன் காந்தத்திருப்புத் திறனில் ஏற்படும் மாற்றம் எவ்வளவு?

காந்தத்திருப்புத் திறனுக்கும், கோணத் திசைவேகத்திற்கும் உள்ள தொடர்பு

$$M = i.A = -\frac{e}{T}.\pi r^2$$

இதில் T என்பது எலக்ட்ரானின் சுற்றுக்காலம். ஆனால் $\omega_0 = 2\pi / T$ என்பதால்,

$$M = - \frac{er^2}{2} \omega_0 \qquad (3.4)$$

என வருவிக்கலாம். எனவே $d\omega$ என்ற கோணத்திசை வேக மாறுதல் ஏற்படுத்தும் காந்தத்திருப்புத்திறன்

$$|dM| = - \frac{er^2}{2} |d\omega|$$

$$= - \frac{e^2 r^2 B}{4m} \qquad (3.5)$$

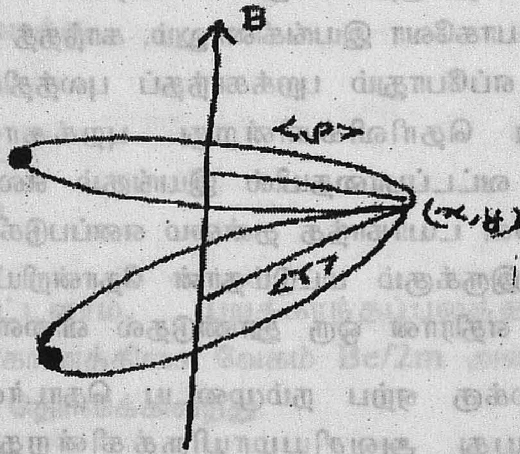
இதில் வரும் எதிர்குறியானது எலக்ட்ரான் வலஞ்சுழியாகவோ அல்லது இடஞ்சுழியாகவோ இயங்கினாலும், காந்தத் திருப்புத்திறனில் ஏற்படும் மாற்றம் எப்போதும் புறக்காந்தப் புலத்திசைக்கு எதிராக இருக்கும் என்று தெரிவிக்கின்றது. புறக்காந்தப்புலத்தில் வைக்கப்பட்டுள்ள வட்டப்பாதையில் இயங்கும் எலக்ட்ரான் பெறும் காந்தத்திருப்புதிறனே டயாகாந்த தன்மை எனப்படுகின்றது. மேலும் புறக்காந்தப்புலம் இருக்கும் மட்டும்தான் தோன்றியிருப்பதால் இது தூண்டுபுலத்திற்கு எதிரான ஒரு தூண்டுதல் விளைவாகும்.

இயல்பு நிலைக்கு ஏற்ப நம்முடைய தொடர்பைத் திருத்தம் செய்ய வேண்டியது அவசியமாயிருக்கின்றது. முதலாவது அணுக்களில் எலக்ட்ரான்களின் சுற்றுப்பாதை மிகச்சரியான வட்டங்களாக இல்லை, நீள்வட்டங்களாகவும் இருக்கின்றன. எனவே சுற்றுப்பாதையின் சராசரி ஆரத்தை எடுத்துக்கொள்ள வேண்டியதாயிருக்கின்றது. இதை <r> என்று குறிப்பிடலாம். எனவே சமன்பாடு (3.5)யை

$$M_{\text{டயா}} = |dM| = - \frac{e^2 B}{4m} \langle r^2 \rangle$$

என்று திருத்தம் செய்யலாம்.

இரண்டாவதாக, நம்முடைய கொள்கையில் எலக்ட்ரானின் வட்டப்பாதை காந்தப்புலத்திற்கு நேர்குத்தாக இருப்பதாகக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. உண்மையில் இந்த எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் திசையமைவு (orientation) புறக்காந்தப்புலத்திற்கு எந்தக் கோணத்திலும் இருக்கலாம். திசையமைவிற்குஏற்ப அதன் நேர்குத்துக் குறுக்குப் பரப்பு இருப்பதால், பயன்முனைப்பான பரப்பைக் கொண்டு சமன்பாட்டைத் திருத்திக் கொள்ளவேண்டும். இதற்குப் புலத்திசை அச்சிலிருந்து எலக்ட்ரானின் நேர்குத்துத் தொலைவைக் கருத்திற்கொள்ள வேண்டும். புலத்திசைச் சாய்வாக அமைந்திருக்கின்ற எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் சராசரி ஆரம் $\langle r \rangle$ புலத்திற்குச் செங்குத்தான தளத்தில் ஏற்படுத்தும் எறிவீச்சு (projection) $\langle \delta \rangle$ என்போம்.



படம் 3.3 எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் பயன்முனைப்பான பரப்பு

எனவே

$$M_{\text{டயா}} = - \frac{e^2 B}{4m} \langle \delta^2 \rangle$$

$$\langle \delta^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle$$

இதில்

அணுக்கருவைப் பொருத்து எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் சராசரி இருமடி ஆரம்

$$\langle r^2 \rangle = \langle x^2 \rangle + \langle y^2 \rangle + \langle z^2 \rangle$$

அணுவில் எதிர்மின்னூட்டம் சமச்சீரான கோளகப் பகிர்வுடையதாக இருக்கும் என்று கருதலாம் என்பதால்

$$\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle$$

எனவே

$$\langle r^2 \rangle = 3(x^2) = 3\langle y^2 \rangle = 3\langle z^2 \rangle$$

இதிலிருந்து

$$\langle x^2 \rangle = \langle y^2 \rangle = \langle z^2 \rangle = 1/3 \langle r^2 \rangle$$

என்ற தொடர்பைப் பெற்று

$$\langle \delta^2 \rangle = 2/3 \langle r^2 \rangle$$

என்று நிறுவலாம். இதைக்கொண்டு தொடர்பில் பதிலீடு செய்ய

$$M_{\text{டயா}} = - \frac{e^2 B}{6m} \langle r^2 \rangle \quad (3.6)$$

அணுவின் டயாகாந்தத் திருப்புதிறன்

அணுவில் ஒன்றுக்கு மேற்பட்ட எலக்ட்ரான்கள் இருக்கலாம். அணுவின் டயாகாந்தத் திருப்புத்திறன் அதிலுள்ள அனைத்து எலக்ட்ரான்களின் டயாகாந்தத் திருப்புத்திறனின் கூடுதலாகும். அணுவின் அணுவெண் z எனில்

$$(M_{டயா})_{அணு} = \sum_{i=1}^{z} (M_{டயா})_{எலக்ட்ரான்\ i}$$

$$= -\frac{ze^2B}{6m}\sum_{i=1}^{z}\langle r_i^2\rangle \qquad (3.7)$$

டயாகாந்த ஏற்புத்திறன்

ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை n_v எனில்; காந்தமாக்கச் செறிவு என்பது n_v மற்றும் ஓரணுவின் காந்தத்திருப்புத் திறன் இவற்றின் பெருக்கல் பலனாகும்.

$$I = -n_v \frac{ze^2B}{6m}\sum_{i=1}^{z}\langle r_i^2\rangle$$

எனவே டயாகாந்தப் பரும ஏற்புத்திறன்

$$\chi_{பருமன்} = \frac{I}{H} = \frac{-n_v z \mu_o e^2}{6m}\sum_{i=1}^{z}\langle r_i^2\rangle \qquad (3.8)$$

இதிலிருந்து டயாகாந்த நிறை ஏற்புத்திறனைக் கணக்கிடலாம்.

$$\chi_{நிறை} = \frac{\chi_{பருமன்}}{பொருள்\ அடர்த்தி}$$

என்பதால்

$$\chi_{நிறை} = \frac{n_m z \mu_o e^2}{6m}\sum_{i=1}^{z}\langle r_i^2\rangle \qquad (3.9)$$

இதில் n_m என்பது பொருளின் ஓரலகு நிறையிலுள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையாகும். ஒரு மோல் செறிவுள்ள பொருளை

எடுத்துக்கொண்டால், அதன் காந்த ஏற்புத்திறனை மோலார் டயாகாந்த நிறை ஏற்புத்திறன் என்பர்.

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{-Nz\mu_o e^2}{6m} \sum_{i=1}^{z} \langle r_i^2 \rangle \qquad (3.10)$$

இதில் N என்பது அவகாட்ரோ எண்.

டயாகாந்தப் பண்புகள்

மேலே வருவிக்கப்பட்டுள்ள தொடர்பிலிருந்து நாம் டயாகாந்தப் பண்பு பற்றிய சில விவரங்களை அறிந்து கொள்ள முடியும்.

1. டயா காந்த ஏற்புத்திறனின் அளவு எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதையின் அச்சுச் சுழற்சியால் ஏற்படுகின்றது. இச்சுழற்சி இயக்கம் வெப்பநிலை மாறுபாட்டால் பாதிக்கப்படுவதில்லை. அதனால் பொருட்களின் டயாகாந்தத் தன்மை அதன் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதில்லை என்று முடிவு செய்யலாம். ஆனால் உண்மையில் பிஸ்மத், காரமண் போன்ற உலோகங்கள் 20K வெப்பநிலைக்குக்கீழ் வெப்பநிலை சார்புற்ற டயாகாந்தத் தன்மையைப் பெற்றிருக்கின்றன என்று கண்டறிந்துள்ளனர். இது லாஞ்செவின் காந்தக் கொள்கையின் ஓர் இயலாமையாகும்.

2. எல்லாப் பொருட்களும் அணுக்களால் ஆக்கப்பட்டிருப்பதாலும், எல்லா அணுக்களிலும் ஒன்று அல்லது அதற்கும் மேற்பட்ட எலக்ட்ரான்கள் இருப்பதாலும், எல்லாப் பொருட்களும் அடிப்படையில் டயாகாந்தப் பண்பினைக் கொண்டிருக்கின்றன. பொருள் பெற்றிருக்கின்ற பிற காந்தப் பண்புகளினால், குறைந்த அளவும் எதிர்குறித் தன்மையும் உடைய அதன் டயா காந்தப்பண்பு மறைக்கப்பட்டு விடுகின்றது.

3. டயாகாந்தத் தன்மை புறக்காந்தப்புலச் செறிவைச் சார்ந்து மாறுதலுக்கு உள்ளாவதில்லை. அதனால் டயாகாந்தத் தன்மையின் அளவு புலச்செறிவு அதிகரிக்கத் தெவிட்டிய நிலையை அடையப் பெறுவதில்லை.

4. புறகாந்தப் புலத் திசைக்கு எதிர்த்திசையில் காந்தமாக்கம் செய்யப்பட்டுப் பொருள் வலிமையற்ற டயாகாந்தத் தன்மையைப்

பெறுகின்றது. இது பொருள் ஊடாகச் செல்லும் புறகாந்தப்புலத்தின் பாயச் செறிவு, வெற்றிடவெளியில் இருப்பதைக் காட்டிலும் குறைவாக இருந்தால் மட்டுமே இயலும். எனவே

$B < B_o$

$\mu_a H < \mu_o H$

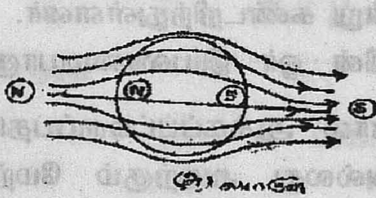
அல்லது

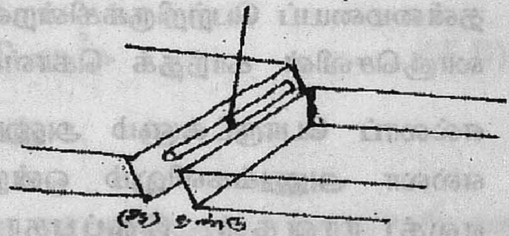
$\mu_a < \mu_o$

அதாவது டயா காந்தப் பொருட்களின் காந்த உட்புகுதிறன் (permeability) வெற்றிடத்திற்குரிய மதிப்பைக் காட்டிலும் குறைவாக இருக்கின்றது. பொருளின் காந்த ஒப்பு உட்புகுதிறனை μ_r

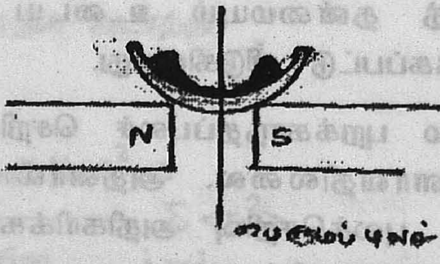
$\mu_r = \mu_a / \mu_o$

எனக் குறிப்பிடலாம். இதன்படி டயாகாந்தப் பொருட்களின் காந்தஒப்பு உட்புகுதிறன் 1-யை விடக் குறைவு





(அ) பொருள் (ஆ) தண்டு



(இ) நீர்மம்

படம் 3.4 புறக்காந்தப்புலத்தில் டயாகாந்தப் பொருள்

5. டயாகாந்தப் பொருட்களுக்குக் காந்தமாக்கச் செறிவு எதிர்குறியுடையதாக இருப்பதால்

$$B = \mu_o H - \mu_o I = \mu_o (H-I)$$

$I = M_{பருமன்}$ என்பதால்

$$\mu_a = \mu_o (1-\chi_{பருமன்})$$

அல்லது $\chi_{பருமன்} = -(\mu_r - 1)$

6. டயாகாந்தப் பொருட்கள் வலிமையான காந்தப்புலத்தால் விலக்கப்படுகின்றன. அதனால் ஒரு சீரற்ற காந்தப்புலத்தில் டயாகாந்தப் பொருளை வைத்தால், அது வலிமையான புலச்செறிவுள்ள பகுதியை விட்டு விலகி, வலிமை குறைந்த புலச்செறிவுள்ள பகுதியை நோக்கி நகர்கின்றது. (படம். 3.4)

3.6 டயாகாந்தப் பண்பிற்கான குவாண்டம் கொள்கை

m என்ற நிறையும் -e மின்னூட்டமும் உடைய ஓர் எலக்ட்ரான் ஒரு மின்காந்தப் புலத்தில் v என்ற நேர்கோட்டுத் திசைவேகத்துடன் இயங்குவதாகக் கொள்வோம். மின்புலத்தாலும், காந்தப் புலத்தாலும் எலக்ட்ரான்மீது செயல்படும் மொத்தவிசை லாரன்சு விசை (F) எனப்படும்.

$$F = -e [E + v \times B]$$

இதில் $E = -\nabla\phi - \partial A/\partial t; B = \nabla \times A$

வெக்டார் சூத்திரப்படி,

$$v \times \nabla \times A = \nabla(A.v) - (\nabla.v)A$$

இதைப் பதிலீடு செய்ய

$$F = -e \{-\nabla\phi - [\partial A/\partial t + (\nabla.v)A] + \nabla(A.v)\}$$

இதில ϕ என்பது ஸ்கேலார் அல்லது திசையிலி அழுத்தம் (scalar potential) என்றும் A என்பது வெக்டார் அல்லது திசை அழுத்தம் என்றும் கூறுவர். மேலும்

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial t} + (v.\nabla)A$$

என்பதால்,

$$F = -e\,[-\nabla(\phi - v.A) - dA/dt] = d/dt\,(mv)$$

இதைத் திருத்தி அமைத்து

$$d/dt\,(mv - eA) = e\nabla(\phi - v.A) \qquad (3.11)$$

என எழுதலாம்.

தொல்லியற்பியலில் லக்ராஞ்சுவின் சமன்பாடு

$$\frac{d}{dt}\;\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0$$

என அறிவோம். இவ்விரு சமன்பாடுகளையும் ஒப்பிட்டால்

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} = p_i = mv_i - eA_i$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\,[e\,(\phi - v_i.A_i)]$$

தொகுப்பாக்கத்தின்மூலம்

$$L = 1/2\,mv^2 - e\,(v.A) + k_1$$

$$L = e\phi - e\,(v.A) + k_2$$

என்ற தொடர்புகளைப் பெறலாம். இதில் k_1, k_2 என்பன தொகுப்பாக்க மாறிலியாகும். இவ்விரு தொடர்புகளும் உண்மையெனில் $k_2 = 1/2mv^2$ என்றும் $k_1 = e\phi$ என்றுமிருக்க வேண்டும். எனவே

$$L = 1/2\ mv^2 + e\ (\phi - v.A) \tag{3.12}$$

ஹாமில்டன் சார்பை

$$H = \Sigma P_i \,.\, x_i - L$$

$$= (mv - eA).v - [1/2\ mv^2 + e\ (\phi - v.A)]$$

$$= 1/2m\ (P+eA)^2 - e\ \phi$$

உந்தத்திற்கான செயலி $ih\nabla$ என்பதால் H-ன் x-அச்சுக்கூறு

$$H_x = \left(-ih \frac{\partial}{\partial x} + eA_x\right)\left(-ih \frac{\partial}{\partial x} + eA_x\right)$$

இதை Ψ என்ற எலக்ட்ரான் அலைச்சார்பின் மீது செயற்படுத்தினால்

$$H_x\ \psi = -h^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - ihe\left(\psi \frac{\partial Ax}{\partial x} + 2A_x \frac{\partial \psi}{\partial x}\right) + e^2 A_x^2\ \psi$$

இதிலிருந்து

$$H = \frac{-h^2}{2m} \nabla^2 - \frac{ihe}{2m} \nabla.A - \frac{ihe}{2m}\left(A_x \frac{\partial}{\partial x} + A_y \frac{\partial}{\partial y} + A_z \frac{\partial}{\partial z}\right) + \frac{e^2 A^2}{2m} - e\phi \tag{3.13}$$

என்று ஹாமில்டன் செயலியைப் பெறலாம்.

லாரன்ஸ் நிபந்தனைப்படி

$$\nabla . A = - \frac{1}{c^2} \frac{\partial A}{\partial t}$$

திசை மற்றும் திசையிலி அழுத்தங்களின் ஆயக்கூறுகளுக்கிடையேயான தொடர்பையும் வருவிக்க முடியும்.

$$\nabla x\,(Bxr) = B\,divr - r\,divB + (r.grad)B - (B.grad)\,r$$

காந்தப்புலம் சீரானதாக இருக்கும்பொழுது,

$div\ B = 0$

$div\ r = 3$

$grad\ B = 0$

$grad\ r = \hat{r}$

எனவே $(B.grad)\ r = B$

$\nabla x\ (Bxr) = 2B$

அல்லது $B= 1/2\ (\nabla x\ Bxr)$

$B= \nabla xA$ என்பதால்

$A = 1/2\ (Bxr)$

கணக்கீட்டின் எளிமைக்கு B, z-அச்சுக்கு இணையாகச் செயல்படுவதாகக் கொள்ளலாம். அதாவது $B_x=B_y=0,\ B_z=B$

எனவே

$$A = 1/2\,(B \times r) = \tfrac{1}{2} \begin{vmatrix} i & j & k \\ 0 & 0 & B \\ x & y & z \end{vmatrix}$$

இதிலிருந்து $A_x = 1/2\, B_y;\ A_y = 1/2\, B_x;\ A_z = 0$

என்று பெறலாம்.

$$A_x = \frac{\partial}{\partial x} + A_y \frac{\partial}{\partial y} + A_z \frac{\partial}{\partial z} = 1/2\, B_y \frac{\partial}{\partial x} + \tfrac{1}{2} B_x \frac{\partial}{\partial y}$$

$$= 1/2\, B\left[x \frac{\partial}{\partial y} - y \frac{\partial}{\partial x}\right]$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{d}{dt} - \frac{e}{4\pi\varepsilon_o r} = 0$$

$$A_2 = A.A = A^2x + A^2y = 1/4\, B^2 (x^2+y^2)$$

ஹாமில்டன் செயலியில் இம்மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்ய

$$H = \frac{-h^2}{2m} \nabla^2 - \frac{ihe}{2m} \frac{1}{c^2}(o) - \frac{ihe}{2m} B\left[x \frac{\partial}{\partial y} + - y \frac{\partial}{\partial x}\right] + \frac{e^2}{8m} B^2 (x^2+y^2) - e\phi \qquad (3.14)$$

$$= H_o + H'$$

இதில் H' என்பது

$$H' = \frac{-iheB}{2m}\left[x\frac{\partial}{\partial y} - y\frac{\partial}{\partial x}\right] + \frac{e^2B^2}{8m}(x^2+y^2) \qquad (3.15)$$

வட்டப்பாதையில் இயங்கும் ஓர் எலக்ட்ரான்மீது ஒரு புறகாந்தப்புலத்தைச் செயல்படுத்த அதன் இயக்கத்தில் ஒரு சிறிய மாற்றம் ஏற்படுகின்றது. இதைச் சிற்றுலைவு (perturbation) என்பர். இதற்கான ஹாமில்டன் செயலியே H' ஆகும்.

(1) எலக்ட்ரான் ஒரு நிரந்தரமான காந்தத் திருப்புதிறனைக் (M) கொண்டதாக இருப்பின், அது M.B என்ற பகுதிக்கூறை ஹாமில்டன் சார்பில் ஏற்படுத்தும். $B_x=B_y=0$ எனக் கொண்டுள்ளதால்,

$$M.B = M_z.B$$

இதில் H' -ல் உள்ள முதல் பகுதியைக் குறிப்பிடுகின்றது. எனவே

$$M_z = \frac{-ihe}{2m}\left[x\frac{\partial}{\partial y} - y\frac{\partial}{\partial x}\right]$$

$$= \frac{-e}{2m}[x.p_y - yp_x]$$

கோணஉந்தத்தின் வரையறைப்படி

$$J_z = xp_y - yp_x$$

எனவே

$$M_z = \frac{-e}{2m} J_z$$

அதாவது H'-ன் முதல் பகுதிக்கூறு, சுற்றுப்பாதை கோண உந்தத்திற்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது. ஓர் அணுக்கருவுடைய அமைப்பில் இது பாரா காந்தத் தன்மைக்குக் காரணமாகும்.

(2) H'-ன் இரண்டாவது பகுதி B^2 க்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது. புறக்காந்தப்புலம் எலக்ட்ரானுக்கு ஒரு காந்தத்திருப்புத் திறன் கிடைக்குமாறு தூண்டினால், அதன் பொருட்டு அது பெறும் ஆற்றல்

-(1/2) IB அல்லது $-\frac{1}{2}\mu_o \chi_{பருமன்} H^2$ ஆகும்.

$$\chi_{பருமன்} = -\frac{n_v \mu_o e^2}{4m} z\,(x^2+y^2)$$

$$= -\frac{n_v \mu_o e^2}{4m} z\,\langle\delta^2\rangle$$

$$= -\frac{n_v \mu_o e^2}{6m} z\,\langle r^2\rangle$$

எனவே H'-ன் இரண்டாவது பகுதி அணுவின் டயாகாந்தத் தன்மைக்குக் காரணமாகின்றது.

ஓரணுவில் மின்னூட்டங்களின் பங்கீட்டுத் தனத்தைக் கொண்டு டயா காந்த ஏற்புத்திறனைக் கண்டறியலாம் என்பதை இதன்மூலம் நாம் அறிந்து கொள்ள முடிகின்றது. குவாண்டம் இயக்கக் கொள்கைப்படி எலக்ட்ரான்களை அலைச்சார்புகளால் குறிப்பிட முடியும். ρ (r) என்பது r தொலைவில் எலக்ட்ரான் மின்னூட்டச் செறிவு என்றால், கோளகச் சமச்சீர்மை உடைய அணுவின் மொத்த எலக்ட்ரான் மின்னூட்டம்

$$\int_0^{\infty} 4\pi r^2 \rho (r)\, dr$$

ஆகும். ஸ்ரோடிங்கர் அலைச்சமன்பாட்டைத் தீர்வு செய்து ρ (r)-ன் மதிப்பைப் பெறமுடியும். இதிலிருந்து $<r^2>$-ன் மதிப்பையும் கண்டறிய முடியும். எனினும் துல்லியமான தீர்வு ஹைட்ரஜன் அணு மற்றும் அதை ஒத்த அயனிகளுக்கு மட்டுமே கிடைக்கக் கூடியதாக இருப்பதால், ஹைட்ரஜன் ஒத்த அணு அமைப்புடையவைகளுக்கு

$$<r^2> = a_0^2 \frac{n^2}{(z^*)^2} \left(\frac{5}{2} n^2 - \frac{3}{2} k^2\right) \qquad (3.16)$$

இதில் a_0 போரின் ஆரமாகும். n மற்றும் k குவாண்டம் எண்களாகும், z* என்பது பயன்முனைப்பான அணுக்கரு மின்னூட்டமாகும். வெளிச் சுற்றுப்பாதைகளில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் மீது அணுக்கருவால் செயல்படும் மின்கவர்ச்சி விசை, உள் சுற்றுப்பாதைகளில் உள்ள எலக்ட்ரான்களால் மட்டுப்படுத்தப்படுவதால் அவை அணுக்கருவின் நேர்மின்னூட்டத்தை வேறுபடுத்தி உணர்கின்றன. எனவே z ஐ அதற்கு ஏற்பத் திருத்திக்கொள்ள வேண்டியதாக இருக்கின்றது.

இத்தொடர்பை வான்வெலக் என்பர் சிறிய திருத்தத்திற்கு உட்படுத்தி

$$<r^2> = \frac{n^2}{(z^*)^2} \left[\frac{5}{2} n^2 - \frac{3l(l+1) - 1}{2}\right] \qquad (3.17)$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம். இதில் l என்பது சுற்றுப்பாதை குவாண்டம் எண்ணாகும். பௌலிங் என்பார் இத்தொடர்பைப் பல எலக்ட்ரான்களை உடைய அணுக்களுக்கும் விரிவுபடுத்தினார்.

$$\Sigma\langle r_i^2\rangle = \Sigma \frac{n^2}{(z-\sigma_i)^2} \left[\frac{5}{2} n^2 - \frac{3l(l+1) - 1}{2} \right] \qquad (3.18)$$

இதில் σ_i என்பது என்ற எலக்ட்ரானுக்குரிய இடைமறைப்பு மாறிலி (Screening constant) யாகும்.

3.7. எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி இயக்கத்தினால் ஏற்படும் காந்தத்தன்மை

எலக்ட்ரான் சுற்றுப்பாதை இயக்கம் தவிர தற்சுழற்சி காரணமாக ஒரு கோண உந்தம் பெற்றிருக்கின்றது. இதன் மதிப்பு sh என்றும் இதில் s என்பது தற்சுழற்சி குவாண்டம் எண் என்றும் அதன் மதிப்பு 1/2 என்றும் நிறுவியுள்ளார்கள். இதன் பொருட்டு எலக்ட்ரானுக்கு ஒரு காந்தத் திருப்புத் திறன் விளையும்.

தொல்லியற்பியல் முறைப்படி இதற்கு விளக்கம் கூற முடியும். ஒரு மின்னூட்டம் பெற்ற துகள் தன்னைத்தானே சுற்றிக் கொள்ளும்போது, அதன் கோள வடிவமான பருமனில் எங்கும் சீராக விரவியிருக்கும் மின்னூட்டம், ஒற்றைமைய வட்டப்பாதைகளில் எடுத்துச் செல்லப்படுகின்றது. அதன் பொருட்டு ஒரு காந்தப்புலம் சுழற்சி அச்சுக்கு இணையாகத் தோற்றுவிக்கப்படுகின்றது எனலாம்.

மின்னூட்டம் கொண்ட ஒரு துகளின் கோண உந்தத்திற்கும் அதன் காந்தத் திருப்புத் திறனுக்கும் ஒரு நெருக்கமான தொடர்புண்டு. ஓர் அடிப்படைத் துகளின் காந்தத் திருப்புத் திறனுக்கும் அதன் கோண உந்தத்திற்கும் உள்ள தகவு ஒரு மாறிலியாக இருக்கின்றது. இத்தகவைச் சுழல் காந்தத் தகவு (gyromagnetic ratio) என்பர். இம்மாறிலி துகளின் மின்னூட்டத்திற்கும் நிறைக்கும் உள்ள தகவிற்குச் சமமாக உள்ளது. எலக்ட்ரானுக்குச் சுழல் காந்தத் தகவு e/m ஆகும். எனவே எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி இயக்கத்தால் ஏற்படும் காந்தத் திருப்புத் திறன்

$$M_{\text{தற்சுழற்சி}} = \frac{-eh}{2m}$$

இது போர்மாக்னெட்டாகும். இதில் வரும் எதிர்குறியானது எலக்ட்ரானின் காந்தத்திருப்புத் திறன் அதன் கோண உந்தத்திற்கு எதிர்த் திசையில் இருப்பதைக் குறிப்பிடுகின்றது.

அணுவில் சுற்றுப்பாதை எலக்ட்ரான்கள் எல்லாம் நேரிணையாக தற்சுழற்சி கொண்டிருப்பதில்லை. இரண்டு இரண்டாக ஜோடி சேர்ந்து எதிரிணையாகச் சுழற்சி பெற்றிருக்கின்றன. அதனால் ஜோடி எலக்ட்ரான்களில் ஒன்றின் காந்தத்திருப்புத் திறன், மற்றொன்றால் நீக்கப்பட்டு விடுகின்றது. ஓர் அணுவில் ஜோடி சேராமல் தனித்தியங்கும் எலக்ட்ரான், அதன் தற்சுழற்சி காரணமாக ஒரு நிலையான காந்தத் திருப்புத்திறனை அணுவிற்கு அளிக்கும். இதன் காரணமாக அணு பெறும் காந்தத்தன்மை பாரா காந்தம் (ியசயஅயபநவெளைஅ) எனப்படுகின்றது.

பாரா காந்தப் பண்புகள்

பொருட்களின் டயா காந்தத் தன்மையும், பாரா காந்தத் தன்மையும் ஒரே நெடுக்கைக்குட்பட்டதாக இருந்தாலும் அவைகளுக்கிடையே பல குறிப்பிடும்படியான வேறுபாடுகள் உள்ளன.

1. டயா காந்தத்தன்மை எலக்ட்ரானின் வட்டப்பாதை இயக்கத்தால் விளைகின்றது. ஆனால் பாரா காந்தத்தன்மை எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சியினால் உண்டாகின்றது.

   பல எலக்ட்ரான்கள் அணுவில் இயங்கும்போது இணை மற்றும் எதிரிணைத் தற்சுழற்சி கொண்ட எலக்ட்ரான்கள் ஜோடி சேர்ந்து கொள்கின்றன. அப்போது அவற்றின் கூடுதல் கோண உந்தம் சுழியாகிவிடுவதால், பொதுவாக இரட்டை எண்ணிக்கையில் எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள அணு பாரா காந்தத் தன்மையைப் பெறுவதில்லை. அணுவில் ஜோடி இல்லாமல் தனித்து ஓர் எலக்ட்ரான் இயங்குமானால் அவ்வணு பாரா காந்தத்தன்மையைப் பெற்று விளங்கும். பொதுவாக ஒற்றை எண்ணிக்கையில் அணுவெண் கொண்ட அணுக்கள் அப்படி இருக்கின்றன.

எடுத்துக்காட்டுகள்

1. ஒற்றை எண்ணிக்கையில் எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள அணுக்கள், மூலக்கூறுகள், குறைபாடுள்ள படிகத் தளங்கள் (Lattice defects) போன்ற அமைப்புகளில் கூடுதல் தற்சுழற்சி சுழியாக இருக்க முடியாது.

   கார உலோக அணுக்கள், ஆக்ஸிஜன் மற்றும் நைட்ரிக் ஆக்ஸைடு (No) மூலக்கூறுகள், ட்ரைபினைல் மீதைல் $C(C_6H_5)_3$ போன்ற பகுதி மூலக்கூறுகள் இதற்கு முக்கியமான எடுத்துக்காட்டுகளாகும்.

2. முழு நிறைவடையாத அகக் கூடுகளுடன் கூடிய அணுக்கள் மற்றும்அயனிகள் பாரா காந்தத் தன்மை கொண்டுள்ளன. இடைநிலைத் தனிமங்கள் (transition elements) அருமண் அல்லது மூவிணைதிறன் மிகு லாந்தனைடுகள் மற்றும் இரும்புத் தொகுதிகள்- இரும்புத் தொகுதி அணுக்களில் 3d கூடு முழுமை பெறாமலும், அருமண் தனிமங்களில் 4f கூடு முழுமை பெறாமலும் இருக்கின்றன.

   இடைநிலைத் தனிமங்களை ஒத்த எலக்ட்ரான் கட்டமைப்பை உடைய அயனிகள், ஆக்டினைடு தொகுதிகள், $Mn^{2}+$, $Gd^{3}+$, U^{++} போன்ற அயனிகள் திண்மப் பொருளில் புதைந்திருக்கும் போது பாரா காந்தத் தன்மையைப் பொருளுக்கு ஊட்டுகின்றன என்றாலும் எல்லாச் சூழ்நிலைகளிலும் அப்படி இருப்பதில்லை.

3. இரட்டை எண்ணிக்கையில் எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள சில கூட்டுப் பொருட்கள் விதிவிலக்காகப் பாரா காந்தத்தன்மையை வெளிப்படுத்துகின்றன. எடுத்துக்காட்டு. மூலக்கூறு ஆக்ஸிஜன், ஈருறுப்பு கரிமப்பகுதி மூலக்கூறுகள். (organic biradicals)

4. உலோகங்கள் (Metals): உலோகங்களில் உள்ள கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் பாராகாந்தத் தன்மையைத் தருகின்றன. ஜோடி இல்லாத எலக்ட்ரான்களால் ஏற்படும் பாரா காந்தத்தன்மையை இயல்பான பாரா காந்தம் என்றும், கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களால் உண்டாவதை பௌலி பாரா காந்தம் என்றும் கூறுவார்கள்.

இவற்றைத் தவிர்த்து வெப்பநிலை சாரா பாரா காந்தம் ஒன்றைக் கொள்கை வாயிலாக வான்வெலக் என்பார் தெரிவித்துள்ளார். அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையிலிருந்து- k_BT அளவுள்ள ஆற்றலை விட அதிகமாக விலகியுள்ள உயர்மட்ட ஆற்றல் நிலைகளை உடைய அணுக்களைக் கொண்டுள்ள பொருள் இத்தகைய பாராகாந்தத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றது. எடுத்துக் காட்டுகளாக $KMnO_4$, CO_{2++}, Eu^{+++}, Sm^{+++} போன்றவற்றைக் குறிப்பிடலாம். இது இயல்பான பாரா காந்தத்தை விட ஏறக்குறைய 10 மடங்கு வலிமை குறைந்தது.

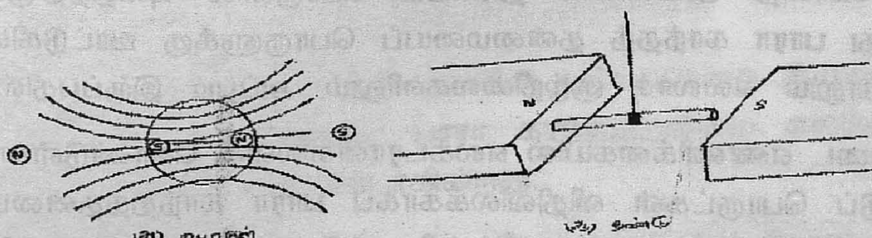
2.புறக் காந்தப்புலத்தில் பொருளை வைக்கும்போது, பாராகாந்தம் பொருளின் ஊடாகச் செல்லும் காந்தப் பாய அடர்த்தி, வெற்றிட வெளியைக் காட்டிலும் சிறிதளவு அதிகமாக உள்ளது.

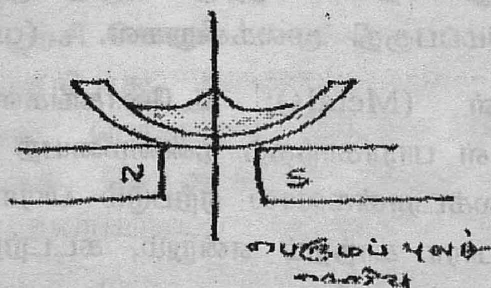
$B > B_o$

$\mu_a H > \mu_o H$

அல்லது $\mu_a > \mu_o$

அதாவது பாரா காந்தப் பொருட்களின் காந்த உட்புகுதிறன், வெற்றிடத்திற்குரிய மதிப்பைக் காட்டிலும் சிறிதளவு அதிகமாக இருக்கின்றது. எனவே காந்த ஒப்பு உட்புகுதிறன் பாரா காந்தப் பொருட்களுக்கு 1 ஐ விடச் சிறிது அதிகம் எனலாம்.





(இ) நீர்மம்

படம் 3.5 புறகாந்தப் புலத்தில் பாராகாந்தப் பொருள்

பாராகாந்தப் பொருட்கள் வலிமையான காந்தப்புலத்தால் ஈர்க்கப்படுகின்றன. அதனால் ஒரு சீரற்ற காந்தப்புலத்தில் பாரா காந்தப் பொருளை வைத்தால் அது வலிமை குறைந்த புலச் செறிவுள்ள பகுதியை விட்டு, வலிமை மிகுந்த புலச் செறிவுள்ள பகுதியை நோக்கி நகர்கின்றது.

3. பாரா காந்தப் பொருட்களுக்கு காந்தமாக்கல் செறிவு நேர் குறி உடையதாக இருப்பதால்

$$B = \mu_o H + \mu_o I = \mu_o (H+I)$$

$I = \chi_{\text{பருமன்}}$ என்பதால்

$$\mu_a = \mu_o (1+\chi_{\text{பருமன்}})$$

அல்லது $\chi_{\text{பருமன்}} = (\mu_r - 1)$

4. காந்த ஏற்புத்திறனும், காந்தமாக்கச் செறிவும் புற காந்தப் புலச் செறிவிற்கு ஏற்ப மாறுவதில்லை. அதாவது பரும காந்தத்திருப்புத் திறனும், காந்த உட்புகு திறனும் புறகாந்தப் புலச் செறிவால் மாறுதலுக்கு உள்ளாவதில்லை.

5. பொதுவாகக் காந்த ஏற்புத்திறன் சார்பிலா வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.

$$\chi_{\text{பருமன்}} \propto \frac{1}{T}$$

அல்லது

$$\chi_{\text{பருமன்}} = \frac{C}{T}$$

இதில் C என்பது ஒரு மாறிலி. இதைக் கியூரி மாறிலி (Curie constant) என்றும் இவ்விதியைக் கியூரி விதி என்றும் கூறுவர். சில பாரா காந்தப் பொருட்கள் திருத்தப்பட்ட கியூரி விதிக்கு, கியூரிவெய்ஸ் விதிக்கு (Curie-Weiss law) உட்பட்டிருக்கின்றன. இதன்படி $\chi_{\text{பருமன்}} = C/(T - \theta)$.

இதில் θ என்பது ஒரு மாறுநிலை வெப்பநிலையைக் குறிப்பிடுகின்ற ஒரு வரம்பு நிலையாகும். பாரா காந்த ஏற்புத்திறன் இம்மாறுநிலை வெப்பநிலையை விடக் கூடுதலாக உள்ள சார்பிலா வெப்பநிலைக்கு எதிர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. எனவே மாறு நிலை வெப்பநிலைக்குக் கீழான வெப்பநிலைகளில் $T < \theta$, காந்த ஏற்புத்திறன் எதிர்க்குறியுடையதாகி விடுகின்றது. அதாவது பாரா காந்தத் தன்மை, டயா காந்தத் தன்மையாக மாறிவிடுகின்றது.

6. பாரா காந்தத் தன்மையைப் புற ஊதாக் கதிர் வீச்சினால் (ultra violet rays) ஒரு பொருளின் மீது தூண்ட முடியம். நாப்தலீன் (napthalene), புளுரெசின் (fluorescene) போன்ற பல கரிமப்பொருட்கள் டயா காந்தத் தன்மை கொண்டிருப்பினும், புற ஊதாக் கதிர்வீச்சுக்கு உட்படும்போது பாரா காந்தங்களாக மாறிவிடுகின்றன. இதற்குக் காரணம் மூலக்கூறுகள் கிளர்ச்சியுற்று மூநிலை (triplet) அல்லது நின்றொளிர்வு நிலை (phosphorescent state) களை அடைந்து ஜோடியில்லாத எலக்ட்ரான்களைப் பெறுவதாகும்.

பாரா காந்தத்தன்மை, மூலக்கூறு கட்டமைப்பு தொடர்பான விபரங்களைத் தெரிவிக்கக் கூடியதாக இருக்கின்றது. அணுக்களின் தற்சுழற்சி, இனக் கலப்பாக்கம் (hybridization) தொடர்பான விவரங்களையும் தெரிவிக்கின்றது. அந்த வகையில் பாராகாந்தம் பற்றி விரிவாகத் தெரிந்து கொள்ள வேண்டியது அவசியமாகின்றது.

3.8. பாரா காந்த ஏற்புத் திறனுக்கான லாஞ்செவின் கொள்கை

லாஞ்செவின் கருத்துப்படி பாரா காந்தப் பொருளை, பாரா காந்தத் தன்மையுடைய துகள்கள் அடங்கிய வளிமமாகக் கருதலாம். பாரா காந்த வளிமத்தின் ஒவ்வொரு துகளும் $M_{\text{அணு}}$ என்ற நிலையான காந்தத் திருப்புத் திறன் உடையதாகக் கொள்ளப்படும். இந்த வளிமத்தை ஒரு புறக் காந்தப் புலத்தில் வைக்கும்பொழுது நிலையான காந்தத் திருப்புத் திறனைக் கொண்டுள்ள ஒவ்வொரு துகளும், அதனுடைய காந்த அச்சு, புலத்திசைக்கு இணையாக இருக்குமாறு அமைத்துக் கொள்ள முயலுகின்றன. புறக்காந்தப் புலம் ஏதும் இல்லாத நிலையில் இத்துகள்களின் காந்த அச்சு எல்லாத் திசைகளையும் நோக்கி இருக்குமாறு சமமாகப்

பங்கிடப்படுவதால், எந்தவொரு குறிப்பிட்ட திசையிலும் பொருளின் விளைவுக் காந்தத் திருப்புத்திறன் சுழியாகவே இருக்கும். புறக் காந்தப்புலத்தில் துகள்களின் காந்த அச்சுகளின் முனைவாக்கம் அவற்றின் வெப்ப இயக்கங்களினால் சீர்குலைவிற்கு ஆளாகின்றது. அதனால் எல்லாத் துகள்களும் அவற்றின் காந்த அச்சு புறக்காந்தப்புலத்திசைக்கு இணையாக இருக்குமாறு அமையாது. புறக்காந்தப்புலத்தின் முனை வாக்கமும், வெப்ப இயக்கத்தின் விளைவும் ஒரு புள்ளியியல் சமநிலையைத் தோற்றுவித்துச் சற்று கூடுதலான துகள்களின் காந்த அச்சு புறக் காந்தப்புலத் திசையை நோக்கித் திரும்பி இருக்குமாறு செய்யும். இது புலச் செறிவிற்கு ஏற்பத் தொடர்ந்து அதிகரிக்கின்றது. இதனால் பொருள் ஒரு காந்தத்திருப்புத் திறனைப் பெறுகின்றது.

பாரா காந்த வளிமத்தின் காந்தப் பண்பை, வளிமத்திற்கான வெப்ப இயக்கக் கொள்கையைக் கொண்டும், மேக்ஸ்வெல் - போல்ட்ஸ்மென் விதியினைக் கொண்டும் விளக்கமுடியும்.

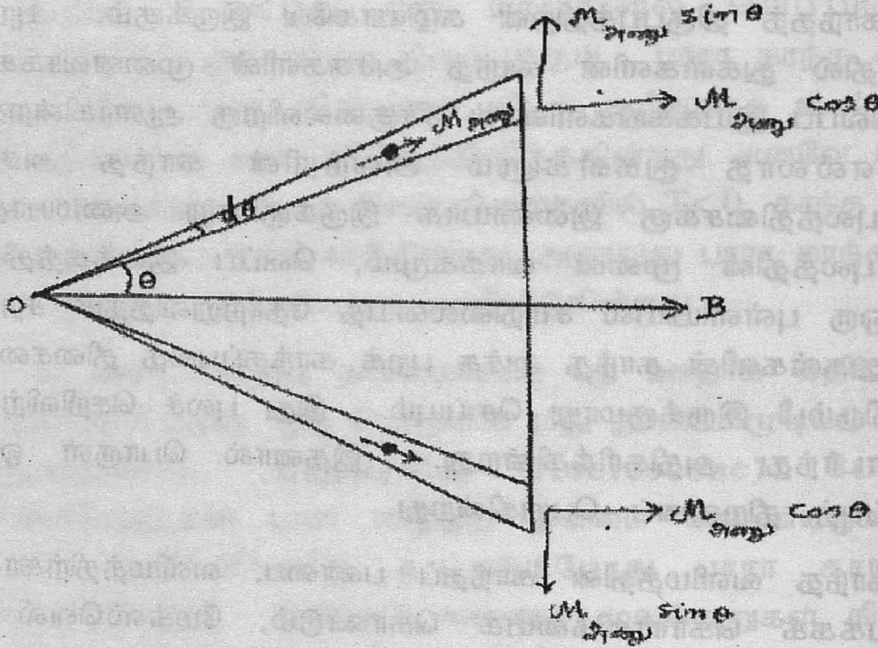
(1) ஆற்றல் சமப்பகிர்வின் அடிப்படையில், ஒரு துகள் தொகுதியில் E என்ற நிலையாற்றலுடைய துகள்களின் எண்ணிக்கை e^{-E/k_BT} என்ற சார்புக்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. இதில் k_B என்பது போல்ட்ஸ்மென் மாறிலியாகும்.

ஒரு துகளின் காந்தத் திருப்புத் திறன் $M_{\text{அணு}}$ என்றும் எல்லாத்துகள்களும் சம அளவு காந்தத் திருப்புத்திறனைப் பெற்றிருக்கின்றன என்றும், புறக்காந்தப் புலச்செறிவு சீரானதாக இருக்கின்றது என்றும் கொள்வோம். துகளின் நிலையாற்றல் துகளின் காந்த அச்சுக்கும், புறக் காந்தப்புலத் திசைக்குமுள்ள கோண விலக்கத்தைப் பொறுத்தது. θ என்பது ஒரு துகளின் காந்த அச்சுக்கும். புறக் காந்தப்புலத்திசைக்குமுள்ள கோணம் என்றால், அத்துகளின் நிலையாற்றல் - $M_{\text{அணு}}$ Bcosθ ஆகும்.

மேக்ஸ்வெல்-போல்ட்ஸ்மென் பங்கீட்டுத்தன் விதிப்படிப் புறக்காந்தப் புலத்திசைக்கு θ கோணம் விலகி இருக்கக்கூடிய துகள்களின் எண்ணிக்கை

$$[e^{M_{\text{அணு}} B \cos\theta/k_BT}]$$

என்ற சார்புக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கும் எனலாம்.



படம் 3.6 புறக்காந்தப்புலத்தில் பாராகாந்த வளிமம்

2. புறகாந்தப் புலத்திலுள்ள எல்லாத் துகள்களையும் ஒன்று திரட்டி '0' என்ற ஒரு புள்ளியில் செறிவுற்று வைப்போம். புள்ளியியல் சமநிலை காரணமாக, புலத்திசைக்கு θ மற்றும் θ +dθ கோணம் விலகி இருக்கும் துகள்களின் எண்ணிக்கை sinθdθ என்ற சார்புக்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கும்.

இவ்விரு அனுமானங்களின் அடிப்படையில் நாம் பாரா காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்பை வருவிக்கலாம்.

ஓரலகு பருமனுள்ள பாரா காந்த வளிமத்திலுள்ள n_v துகள்களில் dn துகள்கள் அவற்றின் காந்த அச்சு θ, θ+dθ கோணம் புறகாந்தப் புலத் திசைக்கு விலகி இருக்குமாறு அமைந்திருப்பதாகக் கொள்வோம். எனவே

$$dn \;\alpha\; e^{M_{\text{அணு}} B / k_B T \cos\theta} \sin\theta d\theta$$

$$= c\, e^{a\cos\theta} \sin\theta d\theta$$

இதில் c என்பது ஒரு மாறிலி, $a = M_{\text{அணு}} B / k_B T$ ஆகும். (3.19)

C - ன் மதிப்பை அறிதல்

காந்த அணுக்களின் கோண விலக்கம் 0விலிருந்து வரை இருக்க முடிய்ம் என்பதால் சமன்பாடு (3.19)ஐத் தொகுத்து, அமைப்பிலுள்ள மொத்தத் துகள்களின் எண்ணிக்கையைப் பெறமுடியும்.

$$n_v = \int_0^{\pi} dn = \int_0^{\pi} e^{a\cos\theta} \sin\theta \, d\theta \qquad (3.20)$$

இதிலுள்ள மாறியை வேறொரு மாறியுடன் தொடர்பு படுத்திக் கொள்ள முடியும். $\cos\theta = x$ என்றால் $dx = -\sin\theta d\theta$. எனவே தொகுப்பாக்கத்தின் எல்லைகள் 1 லிருந்து -1 வரை அமைகின்றது. புதிய மாறியின்படி (3.20) என்ற தொடர்பை

$$n_v = C\int_{-1}^{+1} e^{ax}\, dx$$

$$= \frac{C}{a}[e^{a} - e^{-a}]$$

இதிலிருந்து C என்ற மாறிலியின் மதிப்பை அறியலாம்.

$$C = \frac{n_v a}{[e^{a} - e^{-a}]} = \frac{n_v a}{2\sinh a} \qquad (3.21)$$

காந்தமாக்கச் செறிவு

இனி காந்தமாக்கச் செறிவிற்கான ஒரு தொடர்பை வருவிப்போம். $M_{அணு}$ என்ற காந்தத் திருப்புத் திறனை உடைய ஒரு துகள் θ கோணம் விலகி இருந்தால், புலத்திசையில் இதன் பங்களிப்பு $M_{அணு}$ $\cos\theta$ ஆகும் (படம் 3.6). புலத்திசைக்குச் செங்குத்துத்திசையில் சமச்சீர்மை காரணமாக வளிமத்தின் பங்களிப்பு சுழியாகிவிடுகின்றது

என்பதால் துகளின் காந்தத்திருப்புத் திறனின் அவ்வாக்கக் கூறை கருத்திற் கொள்ள வேண்டிய அவசியமில்லை.

ஓரலகுப் பருமனில் னெதுகள்கள் உடைய பாரா காந்த வளிமத்தில் dn துகள்கள் சராசரியாக கோணம் விலகி இருந்தால், புலத்திசையில் அவற்றின் கூடுதல் காந்தத் திருப்புத்திறன் காந்தமாக்கச் செறிவாகும். எனவே

$$I = \int_{0}^{\pi} M_{\text{அணு}} \cos\theta \, d\theta$$

$$= C M_{\text{அணு}} \int_{0}^{\pi} e^{a\cos\theta} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \qquad (3.22)$$

புதிய மாறியின் அடிப்படையில்

$$I = C M_{\text{அணு}} \int_{-1}^{+1} x^{ax} \, dx$$

$$= CM_{\text{அணு}} \left[\frac{1}{n}(e^{a} + e^{-a}) - \frac{1}{n^2}(e^{a} - e^{-a})\right]$$

c-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய,

$$I = n_v M_{\text{அணு}} \left(\frac{(e^{a} + e^{-a})}{(e^{a} - e^{-a})} - \frac{1}{n}\right)$$

$$= I_s (\cot ha - 1/a) \qquad (3.23)$$

வளிமத்திலுள்ள எல்லாத் துகள்களின் காந்த அச்சும் புறக்காந்தப்புலத்திசையை நோக்கித்திரும்பி இருந்தால் அதன் காந்த மாக்கச் செறிவு பெருமமாக இருக்கும். இதன் மதிப்பு I_s ஆகும்.

இதைத் தெவிட்டிய நிலை என்பர். வளிமம் இத்தெவிட்டிய நிலையை எட்டிய பின்னர், அதன் காந்தமாக்கச் செறிவை, புறக்காந்தப்புலச் செறிவை அதிகரித்து மேலும் அதிகரிக்க முடியாது. எனவே எந்நிலையிலும் $I_s > I$ என்று கூறலாம்.

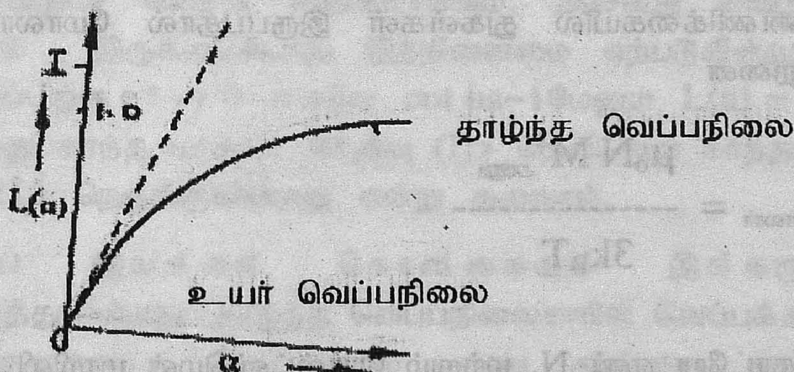
$$\frac{I}{I_s} = \left(\coth a - \frac{1}{a}\right) = L(a) \qquad (3.24)$$

இதில் L(a) என்பது லாஞ்செவின் கோவை (கரஉெவழைஒ) எனப்படும்.

லாஞ்செயின் கோவையை ஒரு வரைபடமாகக் காட்டலாம். வெவ்வேறு 'a' ன் மதிப்புகளுக்கு L(a) ன் மதிப்பைக் கண்டறிந்து இதைச் செய்யமுடியும். இவ்வரைபடத்தை லாஞ்செவின் வளைகோடு (Langevin Curve) என்பர். இதைக் கொண்டு நாம் பொருளின் பாரா காந்தத் தன்மை பற்றிய சில உண்மைகளை அறிந்து கொள்ள முடிகின்றது.

(1) 'a' ன் மதிப்பு அனந்தத்தை நோக்கி அதிகரிக்க L(a) அதாவது I/I_s -ன் மதிப்பு ஒன்றை எட்டுகின்றது.

(2) லாஞ்செவின் வளைகோட்டின் தொடக்கம் ஏறக்குறைய ஒரு நேர்கோட்டில் அமைந்திருக்கின்றது. இது வளைகோட்டிற்கு ஆய அச்சு மையத்திலிருந்து வரையப்படும் தொடுகோட்டோடு ஒன்றியிருக்கின்றது.



படம் 3.7 லாஞ்செவின் வளைகோடு

பாராகாந்த வளிமத்தின் பாராகாந்தத் தன்மையை இருவேறு சிறப்புநிலைகளில் விவரிக்கலாம்.

நிலை (1)

'a' ன் மதிப்பு சிறியதாக இருந்தால் $M_{அணு} B<k_B T$, அதாவது புறக்காந்தப் புலச் செறிவு குறைவாகவும், அல்லது சார்பிலா வெப்பநிலை அதிகமாகவும் இருக்கும் போது இந்நிலைமை ஏற்படும் எனலாம். aன் மதிப்பு தாழ்ந்திருக்கும் போது

$L(a) \sim a/3$

எனவே காந்தமாக்கச் செறிவு,

$$I = \frac{n_v M^2_{அணு} B}{3k_B T} \qquad (3.25)$$

பரும காந்த ஏற்புத்திறன், $$\chi_{பருமன்} = \frac{I}{H} = \frac{\mu_o n_v M^2_{அணு}}{3k_B T} \qquad (3.26)$$

நிறை காந்த ஏற்புத்திறன், $$\chi_{நிறை} = \frac{\chi_{பருமன்}}{\rho} = \frac{\mu_o n_m M^2_{அணு}}{3k_B T} \qquad (3.27)$$

இதில் n_m என்பது ஓரலகு நிறையிலுள்ள துகள்களின் எண்ணிக்கையாகும். மோல் செறிவுள்ள வளிமத்தில் அவகாட்ரோ எண் எண்ணிக்கையில் துகள்கள் இருப்பதால் மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனை

$$\chi_{மோலார்} = \frac{\mu_o N M^2_{அணு}}{3k_B T}$$

அவகாட்ரோ எண் N, மற்றும் போல்ட்ஸ்மென் மாறிலி இவற்றின் பெருக்கல்பலன் வளிம மாறிலி (gas constant) R ஆகும். எனவே

$$\chi_{மோலார்} = \frac{\mu_o (N M_{அணு})^2}{3RT} = \frac{\mu_o M_s^2}{3RT} \quad (3.28)$$

இதில் $M_s = NM_{அணு}$, 1 மோல் செறிவுள்ள வளிமத்தின் காந்தத்திருப்புத் திறனின் தெவிட்டிய மதிப்பாகும். இது

$$\chi_{மோலார்} = \frac{C}{T}$$

என்ற பொதுத் தொடர்பில் அமைந்துள்ளது.

எனவே

$$C = \frac{\mu_o M_s^2}{3R}$$

என்பது கியூரி மாறிலியாகும். இத்தொடர்பு பாராகாந்த வளிமத்தின் காந்த ஏற்புத்திறன் அதன் சார்பிலா வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது என்று தெரிவிக்கின்றது. இதையே கியூரி அல்லது கியூரி - லாஞ்செவின் விதி என்று கூறுகின்றார்கள்.

நிலை (2)

a ன் மதிப்பு அதிகமாக இருந்தால் $M_{அணு} B > k_B T$, அதாவது புற காந்தப்புலச் செறிவு அதிகமாகவும், அல்லது வெப்பநிலை தாழ்வாகவும் இருக்கும்போது இந்நிலைமை ஏற்படுகின்றது. a ன் உயர் மதிப்பிற்கு $e^{-a} \to 0$ எனவே cot ha~1மேலும் $L(a) = (1-1/a) \to 1$ அல்லது காந்த மாக்கச் செறிவு (I)> தெவிட்டிய காந்தமாக்கச் செறிவை (I_s) நெருங்குகின்றது என்று கூறலாம்.

வெப்ப இயக்கக் கொள்கையும் இக்கருத்தை உறுதிப்படுத்துகின்றது. தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் வெப்பக்கிளர்ச்சி மிகவும் குறைவாக இருப்பதால் அணு அல்லது மூலக்கூறு காந்தங்களை மிக எளிதாகப் புறக்காந்தப் புலத் திசையில் திருப்பமுடிகின்றது.

பாரா காந்தம் தொடர்பான லாஞ்செவின் கொள்கையின் எல்கை

பாரா காந்தத் திறனை லாஞ்செவின் கொள்கை வளிமநிலையில் உள்ள அமைப்புகளுக்கு மட்டுமே மிகவும் இணக்கமாக இருக்கின்றது. வளிம மூலக்கூறுகளுக்கிடையே இருக்கக்கூடிய இடையீட்டுச் செயலின் வலிமை மிகவும் குறைவு. அதனால் அவை ஒன்றுக்கொன்று குறுக்கிட்டுக் காந்தப் பண்பில் பாதிப்பை ஏற்படுத்திக் கொள்வதில்லை.

கரைப்பானில் உள்ள மூலக்கூறுகள் முனைதிறனற்றதாக இருந்தால், பாராகாந்த உப்பின் நீர்த்த கரைசலை, பாரா காந்த வளிமமாகக் கருதலாம். கரைப்பான் மூலக்கூறுகளுக்கு நிலையான காந்தத் திருப்பு திறன் இல்லாதிருந்தால், அவை மந்தமாக இருப்பதுடன் கரைப்பான் - கரைபொருள் இடையே குறிப்பிடும் படியான இடையீட்டுச் செயலைத் தோற்றுவிப்பதில்லை

பாரா காந்தம் தொடர்பான லாஞ்செவின் கொள்கையின் இயலாமை

1. சில பாராகாந்தப் பொருட்களின் காந்த ஏற்புத்திறன் மிகச் சிக்கலான முறையில் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருக்கிறது. இதை லாஞ்செவின் கொள்கையால் விளக்க முடியவில்லை.

2. அடர் கரைசல்களின் பாராகாந்தத் தன்மைக்கு விளக்கம் தர இயலவில்லை.

3. கடோலினியம் சல்பேட் $Gd_2(SO_4)_3\,8H_2O$ போன்ற சிலபொருட்களின் காந்தத் தெவிட்டு, மிகச் சரியாக லாஞ்செவின் கொள்கைக்கு ஏற்ப அமைந்திருக்கவில்லை.

4. எல்லா பாரா காந்தப் பொருட்களும் கியூரி விதிக்கு உட்படவில்லை. சில பாராகாந்தப் பொருட்கள் குறிப்பிட்ட வெப்பநிலை நெடுக்கையில், கியூரி - வெயிஸ் விதிக்கு உட்பட்டிருக்கின்றன. இதன்படி

$$\chi_{\text{பாரா}} = \frac{C}{T-\theta}$$

இதில் θ என்பது கியூரி வெப்பநிலை எனப்படுகின்றது. பாரா

காந்தப் பொருட்களின் தன்மைக்கு ஏற்ப இது ஒரு குறிப்பிட்ட மதிப்புடையதாகவோ அல்லது சுழியாகவோ இருக்கும். $\theta = 0$ எனில் கியூரி - வெயிஸ் விதி, கியூரி விதியாகச் சுருங்கி விடுகின்றது. $T<\theta$ எனில் பாரா காந்தம், டயா காந்தமாகி விடுகின்றது. இதற்கான விளக்கத்தை லாஞ்செவின் கொள்கை தரவில்லை.

3.9 பாராகாந்தம் தொடர்பான வெயிஸ் கொள்கை

அகமூலக்கூறு புலம் என்ற ஒன்றை ஏற்படுத்தி லாஞ்செவின் அணுகுமுறையில் ஒரு மாற்றத்தை வெயிஸ் என்பார் ஏற்படுத்தினார். இதன் மூலம் மூலக்கூறுகளிடையேயான இடையீட்டுச் செயல்களின் தாக்கம் கணக்கீட்டில் எடுத்துக் கொள்ளப்படுகின்றது.

வெயிஸ் என்பார் இயல்நிலை வளிமங்களில் உள்ள மூலக்கூறுகள் அவற்றின் காந்தத் திருப்பு திறனால் ஒன்றின் இயக்கத்தை மற்றொன்று பாதிப்பதாகக் கருதி, மூலக்கூறு புலம் என்றொன்று இருக்கவேண்டும் என்று கற்பித்தார். இதன்படி ஒரு புள்ளியில் அதைச் சுற்றியுள்ள மூலக்கூறுகளினால் ஏற்படுத்தப்படும் அகப்புலம் காந்தமாக்கச் செறிவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதுடன் அதே திசைத் தன்மையையும் பெற்றிருக்கின்றது. எனவே பொருளில் உள்ள மூலக்கூறு காந்தங்களின் அச்சு, புறகாந்தப்புலத்தால் மட்டுமின்றி, அமைப்பின் பேரியல் பண்பான மூலக்கூறு அகப்புலத்தாலும் கட்டுப்படுத்தப்படுகின்றது.

மூலக்கூறு அகப்புலத்தின் பாயச் செறிவை B_i என்போம். வெயிஸ் கொள்கைப்படி

$$B_i = \lambda I$$

இதில் λ என்பது ஒரு மாறிலி. வெயிஸ் மாறிலி என்றும் மூலக்கூறு புலத்தின் குணகம் (molecular field coefficient) என்றும் கூறுவர். இது வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதில்லை.

B என்பது புறகாந்தப்புலத்தின் பாயச்செறிவு என்றால் பயன்முனைப்பான புலச்செறிவு (B_e) என்பது புற மற்றும் அகக்காந்தப்புலத்தில் செறிவுகளின் கூடுதலாகும்.

$$B_e = B + B_i = B + \lambda I \quad (3.29)$$

தொல் இயற்பியலின்படி நிறுவப்பட்ட ஒரு பொருளின் பாராகாந்தத் தன்மைக்கான தொடர்பில் இதைப் பதிலீடு செய்ய

$$\frac{I}{I_s} = \frac{M_{அணு} B_e}{3k_BT} = \frac{M_{அணு} (B+\lambda I)}{3k_BT}$$

ஓரலகுப் பருமனில் எண்ணிக்கையில் துகள்கள் இருப்பின் அதன் காந்த மாக்கச் செறிவு I என்றும், தெவிட்டிய மதிப்பு Is என்றும் கொண்டு I-ன் மதிப்பைக் கணக்கிடலாம்.

$$I = \frac{\mu_o M^2_{அணு} B/ 3k_BT}{[1 - \mu_o M^2_{அணு} \lambda/ 3k_BT]}$$

$$\chi_{பருமன்} = \frac{I}{H} = \frac{\mu_o n_v M^2_{அணு} /3k_B}{[T - n_v M^2_{அணு} \lambda/ 3k_B]}$$

$$\chi_{நிறை} = \frac{\mu_o n_m M^2_{அணு} /3k_B}{[T - n_v M^2_{அணு} \lambda/ 3k_B]}$$

$$\chi_{மோலார்} = \frac{\mu_o I_s^2 /3R}{T - \theta} = \frac{C}{T - \theta} \qquad (3.30)$$

இதில் C என்பது கியூரி மாறிலியாகும். $\theta = n_v M^2_{அணு} \lambda/ 3k_B$ இதைக் கியூரி வெப்பநிலை என்பர்.

இத்தொடர்பிலிருந்து. பொருட்களினுள் தோன்றும் அகக் காந்தப்புலத்தினால், ஒரு குறிப்பிட்ட மாறுநிலை வெப்பநிலைக்கு மேல், அப்பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் பொருளின் சார்பிலா வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கின்றது என்பதை அறியலாம். பெரோ காந்தப் பொருட்களில் கியூரி வெப்பநிலை நேர்குறி உடையதாக இருக்கும். அவ்வெப்பநிலையில் பெரோ காந்தப்பண்பு, பாரா காந்தப்பண்பாக மாறிவிடுகின்றது. ஆனால் பாராகாந்தப் பொருட்களுக்குக் கியூரி வெப்பநிலையின் மதிப்பு மிகக் குறைவாக,

நேர்குறியுடையதாகவோஅல்லது எதிர்குறியுடையதாகவோ இருக்கும். $T < \theta$ என்ற வெப்பநிலையில் பாரா காந்தத் தன்மை, டயா காந்தத் தன்மையாக மாறிவிடுகின்றது.

3.10 பொருளின் பாராகாந்தத் தன்மைக்கான குவாண்டம் கொள்கை

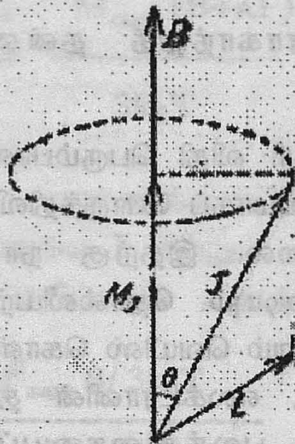
லாஞ்செவின் - கியூரி விதி பெரும்பான்மையான பாரா காந்தப் பொருட்களுக்குத் தோராயமாகப் பொருந்திவிடுகின்றது. துல்லியமான மதிப்பைத் தருவதில்லை. இதற்கு நாம் ஒரு காரணத்தைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்ல முடியும். தொல்லியற்பியலின் அடிப்படையில் எழுந்த லாஞ்செவின் மற்றும் வெயிஸ் கொள்கைகளில், எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதைத் தளமும், எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி காந்தத்திருப்பு திறனும் புறக்காந்தப் புலத்திசையைப் பொறுத்து எல்லாத் திசைகளிலும் விலகி இருக்கமுடியும் என்று கருதப்பட்டுள்ளது. குவாண்டம் கொள்கையில். அவற்றின் காந்தத் திருப்புத்திறன் சில குறிப்பிட்ட குவாண்டம் அளவுகளை மட்டுமே கொண்டிருக்க முடியும் என்பதால், ஒரு புறக் காந்தப்புலத்தில் சில குறிப்பிட்ட தனித்தனியான நிலைகளை மட்டுமே பெற்றிருக்கும் இதன்படி J அலகு மொத்தக் கோண உந்தமுடைய ஓர் அணுவை, புறக் காந்தப்புலத்தில் வைத்தால், எலக்ட்ரான் வட்டப்பாதையின் அனுமதிக்கப்படுகின்ற திசையமைவுகள்

$$J \cos\theta = m_J$$

என்ற தொடர்பால் அறியப்படும். m_J என்பது குவாண்டம் கொள்கையில் மொத்தக் காந்த குவாண்டம் எண் (total magnetic quantum number) எனப்படும். இது J, J-1, J-2, ...1,0,-1 ....(j-2), - (J-1)-J என (2J+1) மதிப்புகளைப் பெற்றிருக்கும். அதாவது J என்ற மொத்தக்கோண உந்தமுடைய ஓர் அணுவின் காந்தத் திருப்புத்திறன் புறக்காந்தப்புலத்திற்கு எல்லாத் திசைகளிலும் நோக்கி இருப்பதைவிட (2J+1) எண்ணிக்கையால் தேர்வு செய்யப்பட்ட சில குறிப்பிட்ட திசைகளில் மட்டுமே இருக்கும் எனலாம்.

மொத்த சுற்றுப்பாதைக் கோண உந்தமும் (L), தற்சுழற்சி கோண உந்தமும் (S) ஒன்றிணைந்து அமைப்பிற்கு ஒரு மொத்தக்கோண உந்தத்தைத் (J) தருகின்றது. ஆற்றல் பிரிநிலைகள், $k_B T$ அளவை ஒப்பிட அதிகமாக இருக்குமாறு, மிகுந்த இடைவெளியுடன்

அமையும்போது Lம், Sம் இணையும் வாய்ப்பு மிகைப்படுகின்றது. அதாவது L-S பிணைப்பு வலுவடைகின்றது.



படம் 3.8 புலத்திசையைப் பொறுத்து அணுவின் அனுமதிக்கப்பட்ட திசையமைவுகள்

அணுவின் காந்தத்திருப்புதிறன் அதன் கோண உந்தத்திற்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதால்

$$M_J \alpha J$$
$$= -J\mu_B$$

எனினும் காந்தப்புலத்தில் அணுக்கதிர்கள் காட்டும் விலக்கம், இத்தொடர்பிற்கு ஒரு திருத்தம் செய்கின்றது. அதன்படி

$$M_J = - g_J J \mu_B \quad (3.31)$$

இத்திருத்தக் காரணியை g-காரணி என்றும், லாண்டே பிரிதிறக்காரணி (Lande splitting factor) என்றும் கூறுவர். μ_B என்பது போர் மாக்னெட்டானாகும். புறக்காந்தப் புலத்திசையில் இதன் ஆக்கக்கூறு $+m_J g_J J \mu_B$ ஆக இருக்கும்.

காந்தத்தன்மை கொண்ட மூலக்கூறுகள் ஒன்றுக்கொன்று இடையீட்டுச் செயல் புரியாது என்றும். புறக்காந்தப்புலத்தில் இவற்றில் ஆற்றல் பங்கீட்டுத்தனம் மேக்ஸ்வெல் - போல்ட்ஸ்மென் விதிக்கு உட்பட்டிருக்கின்றன என்றும், அதே தொல்லியற்பியல் கருத்துகளை

இங்கும் கருதலாம். எனவே M_J திருப்புத்திறனுடைய துகளின் நிலையாற்றல்

$$U = - m_J\, g_J\, J\, \mu_B\, .\, B$$

இதில் $m_J = J, (J-1), \ldots .0, \ldots .-(J-1), -J$

புள்ளியியல் கொள்கைப்படி, வளிமத்தில் m_J குவாண்டம் எண் கொண்ட துகள்களின் எண்ணிக்கை e^{-U/k_BT} க்கு அதாவது $e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}$ க்கு நேர் விகிதத்தில் இருக்கும் எனலாம்.

முன்பு பின்பற்றிய வழிமுறையைப் போல, m_v துகள்கள் கொண்ட ஓரலகுப் பருமனுள்ள வளிமத்தை எடுத்துக் கொள்வோம். இதில் dn துகள்கள் m_j என்ற குவாண்டம் எண் கொண்டதாக இருப்பின்

$$dn = C\, e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}$$

இதைத் தொகுக்க, அமைப்பிலுள்ள மொத்தத் துகள்களின் எண்ணிக்கை கிடைக்கும் என்பதால்,

$$n_v = \int dn = C \sum_{-J}^{J} e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T} \qquad (3.32)$$

அல்லது

$$C = \frac{n_v}{\sum_{-J}^{J} e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}}$$

தொடர்ச்சியாக இன்றிப் படிப்படியாக J-ன் மதிப்பு மாறுவதால், தொகுப்பாக்கக் குறியீட்டிற்குப் பதிலாகத் தொடர் கூட்டுக்குறியீடு பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது.

dn துகள்கள் அதுபது B என்ற காந்தத் திருப்புத்திறனை புறகாந்தப் புலத் திசைக்கு இணையாக வழங்குகின்றன. புலத்திசையைப் பற்றிய லார்மர் சுழற்சி இயக்கத்தினால், புலத்திசைக்குச் செங்குத்துத் திசையில் அவற்றின் ஆக்கக்கூறுகள் சுழியாக்கப்பட்டு விடுகின்றன. எனவே காந்தமாக்கச் செறிவை

$$I = \sum_{-J}^{J} m_J g_J \mu_B \, dn$$

dn-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$I = \frac{n_V \sum_{-J}^{J} m_J g_J \mu_B \, e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}}{\sum_{-J}^{J} e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}} \qquad (3.34)$$

இதிலிருந்து பரும, நிறை மற்றும் மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனைப் பெறமுடியும்.

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N/H \sum_{-J}^{J} m_J g_J \mu_B \, e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}}{\sum_{-J}^{J} e^{m_J g_J \mu_B . B/k_B T}} \qquad (3.35)$$

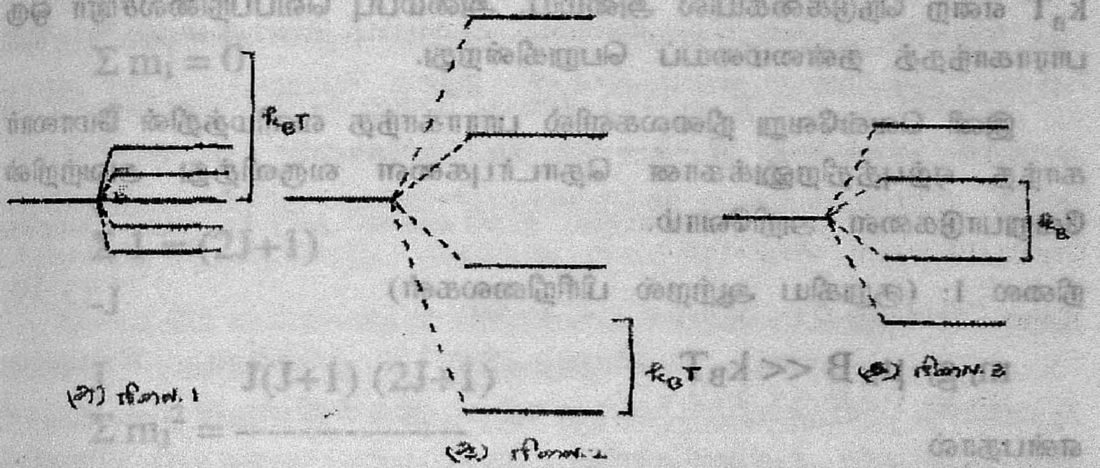
சில சிறப்பு நிலைகளைக் கருத்திற்கொண்டு, இத்தொடர்பை நாம் மேலும் அணுகலாம்.

நிலை:1

e-ன் அடுக்கெண் (exponent) மிகச்சிறிய அளவினதாக இருந்தால், ஆற்றல் பிரிநிலைகள் நெருக்கமாக J (Narrow multiplet) அமைந்திருக்கும். இந்நிலையில் $m_J g_J \mu_B B << k_B T$

அதாவது வெப்பநிலை அதிகமாகவோ அல்லது புறக்காந்தப்புலச்செறிவு தாழ்வாகவோ இருக்கும்போது இந்நிலை ஏற்படுகின்றது. ஆற்றல் பிரிநிலைகளின் இடைவெளி அகலம், $k_B T$-

ஐ ஒப்பிட மிகவும் குறைவாக இருக்கும்.



படம் 3.9 சிறப்பு நிலைகளில் ஆற்றல் பிரிநிலைகள்

இந்நிலையில் L-S பிணைப்பு மாறிலி மிகவும் குறைவாக இருக்கும். அப்போது L மற்றும் S வெக்டார்கள் தனித்தனியாகக் காந்தப்புலத்தைப் பற்றி சுழற்சி இயக்கத்தைப் பெறலாம்.

நிலை:2

e-ன் அடுக்கெண் அதிக மதிப்புடையதாக இருப்பின், ஆற்றல் பிரிநிலைகள் பெரிதும் விலகி இருக்கும்.

$$m_J\, g_J\, \mu_B\, B >> k_B T$$

அதாவது வெப்பநிலை தாழ்வாகவோ, அல்லது புறகாந்தப்புலச்செறிவு அதிகமாக இருந்தால் இந்நிலை வலுப்படுகின்றது. இந்நிலையில் L-S பிணைப்பு மாறிலி மிகவும் அதிகமாக இருக்கும். அதனால் ஆற்றல் பிரிநிலைகளின் இடைவெளி அகலம் $k_B T$-ஐ ஒப்பிட மிகவும் அதிகமாக இருக்கும். அப்போது L மற்றும் S வெக்டார்கள் ஒன்றிணைந்து J வெக்டாரைத் தோற்றுவிக்கின்றன. காந்தப்புலத்தில் அமைப்பின் இயக்கம் இந்த J வெக்டாரைப் பொறுத்திருக்கின்றது.

நிலை:3

e-ன் அடுக்கெண் 1க்கு ஏறக்குறையச் சமமாக இருந்தால்

$$m_J\, g_J\, \mu_B\, B \sim k_B T$$

இந்நிலையில் ஆற்றல் பிரிநிலைகளின் இடைவெளி அகலம் $k_B T$ என்ற நெடுக்கையில் அமைய, அமைப்பு வெப்பநிலைசாரா ஒரு பாராகாந்தத் தன்மையைப் பெறுகின்றது.

இனி வெவ்வேறு நிலைகளில் பாராகாந்த வளிமத்தின் மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்புகளை வருவித்து அவற்றின் வேறுபாடுகளை அறிவோம்.

நிலை 1: (குறுகிய ஆற்றல் பிரிநிலைகள்)

$$m_J\, g_J\, \mu_B\, B << k_B T$$

என்பதால்

$$(_e m_J g_J\, \mu_B\, B / k_B T) \sim 1 + m_J g_J\, \mu_B\, B / k_B T$$

என்று தோராயப்படுத்தலாம். எனவே உயர்வெப்பநிலையில்

$$\chi_{மோலார்} = \frac{N/H\, g_J\, \mu_B \sum_{-J}^{J} m_J\, (1+ m_J\, g_J\, \mu_B\, .\, B / k_B T)}{\sum_{-J}^{J} (1+ m_J\, g_J\, \mu_B\, .\, B / k_B T)}$$

m_J-ன் மதிப்பு -J முதல் J வரை முழுஎண் மதிப்புகளாக இருப்பதால்

$$\sum_{-J}^{J} m_J = 0$$

$$\sum_{-J}^{J} 1 = (2J+1)$$

$$\sum_{-J}^{J} m_J^2 = \frac{J(J+1)(2J+1)}{3}$$

இம்மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்து

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{\mu_o N^2 g_J^2 \mu_B^2}{3RT} J(J+1) \qquad (3.36)$$

J என்ற கோணஉந்தத்தோடு தொடர்புடைய காந்தத்திருப்புத்திறன்

$$M_J = g_J J \mu_B$$

அலையியக்கக் கொள்கையில் $J = \sqrt{J(J+1)}$ என்பதால்

$$M_J = g_J \sqrt{J(J+1)}\, \mu_B \qquad (3.37)$$

எனவே

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{\mu_o N^2 M_J^2}{3RT}$$

தொல்லியற்பியல் வழிமுறையில் பெறப்பட்ட தொடர்போடு ஒப்பிட $M_{\text{அணு}}$, M_J ஆல் பதிலீடு செய்யப்பட்டிருக்கின்றது.

(3.37) ஐ கீழ்கண்டவாறும் குறிப்பிடலாம்.

$$M_J = P_{\text{செயலுறு}}\ \mu_B \qquad (3.38)$$

இதில் $P_{\text{செயலுறு}} = g_J\ J(J+1)$ என்பது செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண் மதிப்பாகும்.

அடிமட்ட ஆற்றல்நிலையில் L=0 எனில் J=S ஆகும். எனவே

$$P_{\text{செயலுறு}} = g_J\ \ S(S+1) \qquad (3.39)$$

ஓரணு கொண்ட வளிமங்களில் மேற்கொண்ட சோதனை முடிவுகள் இத்தொடர்பிற்கு ஏற்ப இருக்கின்றன. ஆனால் இடைநிலைத் தனிமங்களில், குறிப்பாக லான்தனைடுகளில் குறிப்பிடும்படியான முரண்பாடு காணப்படுகின்றது. இம்முரண்பாட்டிற்கு வான்வெலக் என்பார் முறையான விளக்கம் கொடுத்தார். எல்லா அணுக்களும் ஒத்த L,S மற்றும் J குவாண்டம் எண்களுடன் ஒத்த ஆற்றல் நிலைகளில் இருக்க வேண்டும் என்ற கட்டாயமில்லை. இந்த ஊகக்கருத்து அகன்ற ஆற்றல் பிரிநிலைகளைக் கொண்ட அமைப்புகளுக்கு மட்டுமே நியாயமானதாக இருக்கமுடியும். உயர்ஆற்றல் நிலையில் இருக்கத் தேவைப்படும் உயரளவு கிளர்ச்சி ஆற்றல் இல்லாமையால், அணுக்கள் எல்லாம் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையிலேயே இருக்கும். இந்நிலை அருமண் தொகுதியைச் சேர்ந்த பல அயனிகளில் காணப்படுகின்றது.

குறுகிய ஆற்றல் பிரிநிலைகளை உடைய அணுக்கள், உயர்ஆற்றல் நிலையில் இருக்கத் தேவைப்படும் குறைந்த அளவு கிளர்ச்சி ஆற்றலை எளிதாகப் பெறமுடிவதாக இருப்பதால், அவை பல்வேறு ஆற்றல் நிலைகளில் இருக்க்கூடிய வாய்ப்பைப் பெறுகின்றன. இந்நிலையில் L-S பிணைப்பு வலுப்படுவதில்லை. மாறாக L,S வெக்டார்கள் தனித்தனியாகப் புறகாந்தப் புலத்தோடு இடைவினை புரிந்து அணுவின் காந்த ஏற்புத்திறனுக்குத் தனித்தனியாகப் பங்களிப்புச் செய்கின்றன.

L,S என்பன அணுவின் மொத்த சுற்றுப்பாதை, மற்றும் தற்சுழற்சி கோணஉந்தம் என்போம். இவை புறக்காந்தப்புலத்தில் முறையே (2L+1) மற்றும் (2S+1) குவாண்டம் தேர்வுநிலைகளைப் பெற்றிருக்கின்றன. அதாவது புறக்காந்தப் புலத்திசையில் டு வெக்டாரின் எறிவீச்சு -L முதல் L வரையிலும் ஆக (2L+1)

மதிப்புகளையும், S வெக்டாரின் எறிவீச்சு -S முதல் S வரையிலுமாக (2S+1) மதிப்புகளையும் பெற்றிருக்கும் இதை முறையே சுற்றுப்பாதை காந்த (m_L) தற்சுழற்சி காந்த (m_S) குவாண்டம் எண்கள் என்பர்.

L வெக்டார் திசையில் அதன்பொருட்டு அணுவின் காந்தத் திருப்புதிறன் $L_{gL}\mu_B$ ஆகும். புறகாந்தப் புலத்திசையில் இதன் பங்களிப்பு $Lg_L \mu_B \cos\theta$ அதாவது $g_L m_L \mu_B$

இதைப்போல S வெக்டார் காரணமாகப் புறகாந்தப்புலத் திசையில் விளையும் காந்தத் திருப்புத்திறனை gsms B எனக் காட்டலாம். சுற்றுப்பாதை மற்றும் தற்சுழற்சி இயக்கங்களோடு தொடர்புடைய லாண்டே பிரிவாக்கக் காரணி முறையே $g_L=1$, $g_s=2$ ஆகும்.

காந்தமாக்கச் செறிவு (I) என்பது ஓரலகுப் பருமனில் இவ்விரு வகை காந்தத் திருப்பு திறன்களின் கூடுதலாகும்.

$$I = n_v\mu_B \left(\frac{\sum_{-L}^{L} m_L e^{m_L \mu_B . B/k_B T}}{\sum_{-L}^{L} e^{m_L \mu_B . B/k_B T}} + \frac{\sum_{-S}^{S} 2m_s e^{2m_s \mu_B . B/k_B T}}{\sum_{-S}^{S} e^{2m_s \mu_B . B/k_B T}} \right)$$

$\mu_B B << k_B T$ என்றும் $a= \mu_B B/k_B T$ என்றும் கொண்டால், குறுகிய ஆற்றல் பிரிவினைகளை உடைய அணுக்களைக் கொண்டுள்ள பாராகாந்த வளிமத்தின் காந்தமாக்கச் செறிவை

$$I = n_v \mu_B \left(\frac{\sum_{-L}^{L} m_L (1+m_L a)}{\sum_{-L}^{L} (1+m_L a)} + \frac{\sum_{-S}^{S} 2m_s (1+2m_s a)}{\sum_{-S}^{S} (1+2m_s a)} \right)$$

$$\sum_{-L}^{L} m_L = 0; \quad \sum_{-S}^{S} m_s = 0; \quad \sum_{-L}^{L} 1 = (2L+1); \quad \sum_{-S}^{S} 1 = (2S+1)$$

$$\sum_{-L}^{L} m_L^2 = \frac{L(L+1)(2L+1)}{3}; \quad \sum_{-S}^{S} m_s^2 = \frac{S(S+1)(2S+1)}{3};$$

இம்மதிப்புகளைக் கொண்டு

$$I = \frac{n_v \mu_B^2 B}{3k_B T} [L(L+1) + 4S(S+1)]$$

இதிலிருந்து $X_{\text{மோலார்}}$-க்கான தொடர்பைப் பெறமுடியும்.

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N^2 \mu_B^2 B}{3RT} [L(L+1) + 4S(S+1)] \tag{3.40}$$

இத்தொடர்பைக் கொண்டு இந்நிலையில் செயலுறு போர்மாக்னெட்டான் எண்ணின் மதிப்பைப் பெறலாம்.

$$P_{\text{செயலுறு}} = L(L+1) + 4S(S+1) \tag{3.41}$$

குறுகிய ஆற்றல் பிரிநிலைகளுக்கும் கியூரி விதி ஏற்புடையதாக இருக்கின்றது. எனினும் $P_{\text{செயலுறு}}$ வின் மதிப்பு மாற்றம் பெற்றுள்ளது.

நிலை: 2

துகளை உயர் ஆற்றல் நிலைக்கு எடுத்துச் செல்ல அதிக ஆற்றல் தேவையாக இருப்பதால், ஏறக்குறைய எல்லாத்துகள்களும் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையிலேயே இருக்கும். அருமண் தொகுதியைச் சேர்ந்த பெரும்பாலான அயனிகள் இந்நிலைக்குத் தக்க எடுத்துக்காட்டுகளாக விளங்குகின்றன. முன்பு வருவித்த தொடர்புகளை (3.36) மற்றும் (3.38) மாற்றமின்றி ஏற்றுக் கொள்ளலாம்.

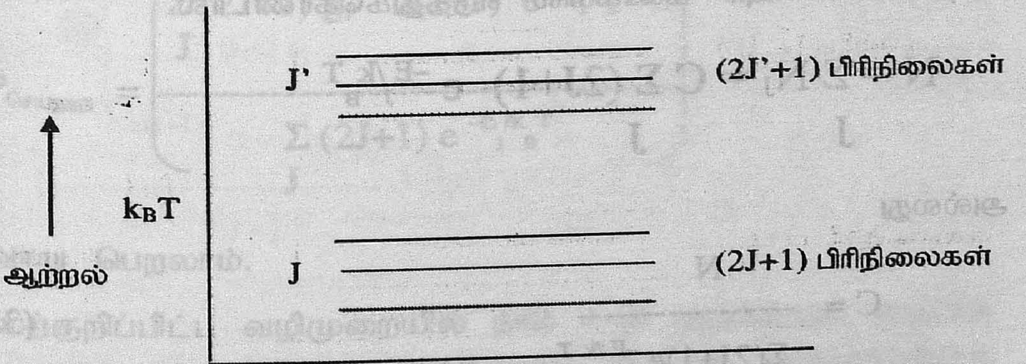
$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{n_v N^2 g_J^2 \mu_B^2}{3RT} J(J+1)$$

$$P_{\text{செயலுறு}} = g_J \sqrt{J(J+1)}$$

இவை துல்லியமாகக் கியூரி விதிக்கு உட்படுகின்றன.

நிலை:3

கிளர்ச்சி ஆற்றல் $\mu_B B << k_B T$ க்கு ஏறக்குறையச் சமமாக இருக்கும்பொழுது வழிமுறை ஓரளவு சிக்கலாகின்றது. கியூரி விதி பொருந்தி வருவதில்லை. சமேரியம் Sm^{+++}, ஈரோப்பியம் Eu^{+++} போன்ற அயனிகளைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம். இந்நிலையில் பொருள் வெப்பநிலை சாராத ஒரு பாராகாந்தத் தன்மையைப் பெறுகின்றது. இதை வான்வெலக் பாராகாந்தம் என்றும் கூறுவர்.



படம் 3.10 ஆற்றல் பிரிநிலைகளின் அகலம் மடிவு நெடுக்கையில் இருக்கும்போது

k_BT க்கு உட்பட்ட அடிமட்ட ஆற்றல்நிலை, இதிலிருந்து k_BT க்கும் அதிகமான ஆற்றல் அகலத்துடன் பிரிந்திருக்கின்ற உயர் ஆற்றல் நிலை என அணு அல்லது அயனிகளின் ஆற்றல்நிலைகள் இரு பகுதிகளாக வகுக்கப்பட்டிருந்தால் வான்வெலக் பாராகாந்தம் ஏற்படுகின்றது. இதில் தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலையில் உள்ள அணுக்கள் கியூரி விதியைப் பின்பற்றுகின்ற பாராகாந்தத்தன்மையும், உயர் ஆற்றல் நிலையில் இருப்பவை வெப்பநிலை சாராத பாராகாந்தத்தையும் உண்டாக்குகின்றன.

ஒரு குறிப்பிட்ட J நிலையிலிருக்கும் அணுக்களின் கூட்டத்தைக் கொண்டு, காந்த ஏற்புத்திறனுக்கு அவற்றின் பங்களிப்பைக் கணக்கிட்டு, அமைப்பின் மொத்தக் காந்தஏற்புத் திறனைக் கணக்கிட்டறியலாம்.

மேக்ஸ்வெல் - போல்ட்ஸ்மென் புள்ளியியல் கொள்கைப்படி E_J என்ற ஆற்றலும் J என்ற மொத்தக்கோண உந்தக்குவாண்டம் எண்ணும் கொண்ட நிலையில் ஓரணு இருப்பதற்கான வாய்ப்பு e^{-E_J/k_BT} க்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. இந்நிலையில் இருக்கக்கூடிய அணுக்களின் எண்ணிக்கை n_J எனில்

$$n_J \,\alpha\, e^{-E_J/k_BT} .$$

பிரிவாக்கக் காரணியைக் கருத்திற் கொண்டால்

$$N_J = C\,(2J+1)\,e^{-E_J/k_BT}$$

C, நேர்விகிதத்தகவின் மாறிலி. இதுபோலப் பல்வேறு ஆற்றல் பிரிநிலைகளையும் கணக்கில் எடுத்துக்கொண்டால்

$$N = \sum_J N_J = C \sum_J (2J+1)\; e^{-E_J/k_BT}$$

அல்லது

$$C = \frac{N}{\sum_J (2J+1)e^{-E_J/k_BT}} \qquad (3.42)$$

ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் பிரிநிலையில் உள்ள அணுக்கள், பொருளின் காந்த ஏற்புத் திறனுக்குத் தரும் பங்களிப்பு

$$\chi_{\text{மோலார்}J} = \frac{\mu_o N_J g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T} \quad (3.43)$$

எல்லா ஆற்றல் பிரிநிலைகளிலும் உள்ள அணுக்களையும் எடுத்துக்கொண்டால்,

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \sum_J \chi_{\text{மோலார்}J} = \sum_J \frac{\mu_o N_J g_J^2 \mu_B^2 J(J+1)}{3k_B T}$$

N_J -ன் மதிப்பையும், அதில் c-ன் மதிப்பையும் பதிலீடு செய்தால்,

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{\mu_o N^2 \mu_B^2}{3RT} \; \frac{\sum_J (2J+1) g_J^2 \; J(J+1) \; e^{-E_J/k_B T}}{\sum_J (2J+1) \, e^{-E_J/k_B T}} \quad (3.44)$$

இதிலிருந்து செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண்மதிப்பை

$$P_{\text{செயலுறு}} = \left(\frac{\sum_J (2J+1) g_J^2 \; J(J+1) \; e^{-E_J/k_B T}}{\sum_J (2J+1) \, e^{-E_J/k_B T}} \right)^{1/2} \quad (3.45)$$

என்றவாறு பெறலாம்.

மேற்குறிப்பிட்ட வழிமுறையில் நாம் e-ன் அடுக்கெண் தாழ்ந்த மதிப்புடையதாகக் கொண்டுள்ளோம். இப்படி அமைந்திராத நிலைகளும் காணப்படுகின்றன. இப்போது அப்படிப்பட்டதொரு நிலையில் இருக்கும் ஒரு பாராகாந்த வளிமத்தின் காந்த

ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்பைப் பெறமுயல்வோம்.

சமன்பாடு (3.35)லிருந்து,

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N/H \sum_{-J}^{J} m_J\, g_J\, \mu_B\, e^{am_J}}{\sum_{-J}^{J} e^{am_J}}$$

இதில் $a = g_J\mu_B B/k_B T$ எனக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. இத்தொடர்பை நாம் பின்வருமாறு எழுதலாம்.

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N}{H} g_J\, \mu_B \frac{d}{da} [\log_e \sum_{-J}^{J} e^{m_J a}]$$

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N}{H} g_J\, \mu_B \frac{d}{da} [\log_e e^{Ja} (1+e^{-a} + e^{-2a}+ . . +e^{-2Ja})]$$

அடைப்பிற்குள் இருப்பவை ஒரு பெருக்குத் தொடர் என்பதால்

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N}{H} g_J\, \mu_B \frac{d}{da} [\log_e (e^{Ja} \frac{1 - e^{-(2J+1)a}}{1- e^{-a}})]$$

$$= \frac{N}{H} g_J\, \mu_B \frac{d}{da} [\log_e (\frac{e^{Ja} - e^{-(J+1)a}}{1- e^{-a}})]$$

பிறை அடைப்பிற்குள் உள்ள பின்னத்தின் மேல் மற்றும் கீழ்ப் பகுதிகளை $e^{a/2}$ ஆல் பெருக்கினால்

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N}{H} g_J \mu_B \frac{d}{da} \left[\log_e \left(\frac{\sinh (J+1/2)a}{\sinh a/2} \right) \right]$$

பகுப்பாக்கம் செய்ய

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N}{H} g_J \mu_B \frac{d}{da} \left(\frac{2J+1}{2} \coth \frac{2J+1}{2} a - \frac{1}{2} \coth \frac{a}{2} \right)$$

இப்போது 'a' என்ற மாறிக்குப் பதிலாக x என்ற ஒரு புதிய மாறியைப் புகுத்துவோம்.

$aJ = x$

எனவே $a = x/J$

இப்புதிய மாறியின் அடிப்படையில்

$$\chi_{\text{மோலார்}} = \frac{N}{H} g_J \mu_B \left(\frac{2J+1}{2J} \coth \frac{2J+1}{2J} x - \frac{1}{2J} \coth \frac{x}{2J} \right) \quad (3.46)$$

$$= (\chi_{\text{மோலார்}})_{\text{பெருமம்}} \; B_J(x) \quad (3.47)$$

இதில்

$$B_J(x) = \left(\frac{2J+1}{2J} \coth \frac{2J+1}{2J} x - \frac{1}{2J} \coth \frac{x}{2J} \right)$$

இதைப் பிரிலோயின் கோவை (Brillouin function) என்பர்.

இரு சிறப்பு நிலைகளை விளக்கி இக்கருத்தை மேலும் தெளிவாக்கிக் கொள்ளலாம்.

நிலை:1

ஓர் அணுவிற்கு L=0 ஆகவும் S=1/2 ஆகவும் இருந்தால் $J = 1/2$, $m_J = \pm 1/2$. எனவே

$$\frac{\chi_{\text{மோலார்}}}{(\chi_{\text{மோலார்}})_{\text{பெருமம்}}} = 2\cot h.2x - \cot hx$$

$$= \tanh x = x - x^3/3 + 2/15\, x^5 + \ldots\ldots$$

நிலை:2

$J \rightarrow \infty$ என்ற நிலையில் முடிவு தொல்லியற்பியலால் நிறுவப்பட்ட முடிவை ஒத்திருக்கின்றது.

$$\frac{\chi_{\text{மோலார்}}}{(\chi_{\text{மோலார்}})_{\text{பெருமம்}}} = L_t{}_{J\rightarrow\infty} \frac{2J+1}{2J} \cot h \frac{2J+1}{2J} x - \frac{1}{2J} \cot h \frac{x}{2J}$$

$$\frac{\chi_{\text{மோலார்}}}{(\chi_{\text{மோலார்}})_{\text{பெருமம்}}} = L_t{}_{J\rightarrow\infty} \left(1 + \frac{1}{2J} \cot h\, 1 + \frac{1}{2J} x - \frac{1}{x}\right)$$

$$= \cot hx - 1/x = L(x)$$

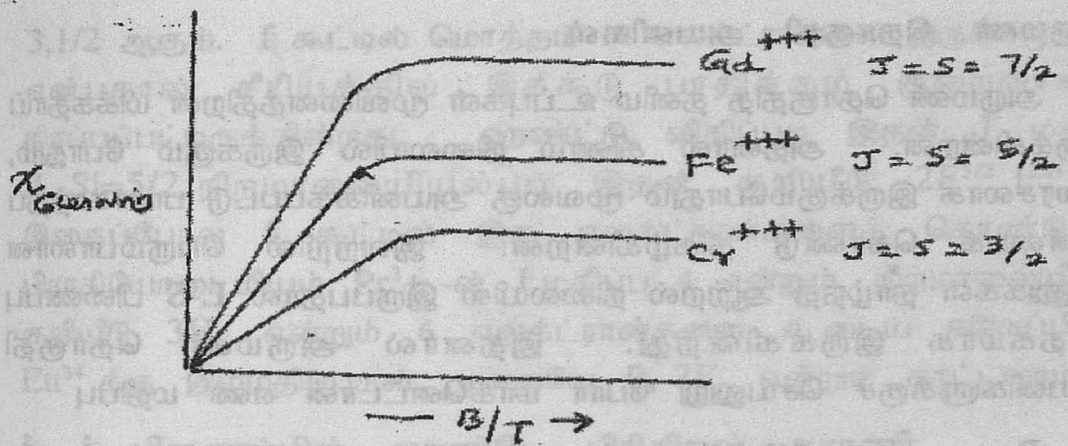
லாஞ்செவின் கோவை.

இவ்வழிமுறைகளிலிருந்து

$$\chi_{\text{மோலார்}} = (\chi_{\text{மோலார்}})_{\text{பெருமம்}}\ B(x)$$

என்ற தொடர்பு ஆய்வு முடிவுகளுக்கு முழுமையான விளக்கம் அளிப்பதாக இருக்கின்றது என்பதை அறிந்து கொள்ளலாம்.

நீர்முலக்கூறு ஏற்றப்பட்ட கடோலினியம் சல்பேட் $[Ga_2 (SO4)_3, 8H_2O]$-f;F. நீர்ம ஹீலியம் வெப்பநிலையில் மேற்கொண்ட சோதனைகள் மூலம் பெறப்பட்ட முடிவுகள் மேற்கண்ட சமன்பாட்டிற்கு ஏற்பத் துல்லியமாக இருப்பது அறியப்பட்டது.

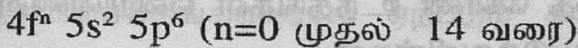


படம் 3.11 சில பாராகாந்த உப்புகளின் காந்தஏற்புத்திறன் B/T வரைபடம்

இது பாராகாந்தப் பொருட்களின் தெவிட்டு நிலையைத் தெரிவிக்கின்றது. மிகத் தாழ்ந்த வெப்பநிலையிலும், செறிவுமிக்க புறகாந்தப்புலத்திலும் காந்தத் தெவிட்டுப் பெறப்படுகின்றது.

3.11 கொள்கையும் சோதனை முடிவுகளும் - ஓர் ஒப்பீடு:

மூவினைத் திறன் கூடிய லாந்தனைடுகள் பெற்றிருக்கும் புறக்கூடு எலக்ட்ரான் அமைவு நிலையை



$4f^n\ 5s^2\ 5p^6$ (n=0 முதல் 14 வரை)

என்று குறிப்பிடலாம். இது லாந்தனம் முதல் லூடிசியம் வரையிலான தனிமங்களை உள்ளடக்கியது. தொடக்கம் மற்றும் இறுதிநிலைத் தனிமங்களான இவையிரண்டும் நிறைவுடைய எலக்ட்ரான் கூடுகளைப் பெற்றிருப்பதால், டயா காந்தத் தன்மையை மட்டும் பெற்றிருக்கின்றன. ஆனால் இவையிரண்டிற்கும் இடைப்பட்ட தனிமங்களின் 4f கூடு முழுமை பெறாமல் இருப்பதால் பாரா காந்தத்தன்மை பெற்று விளங்குகின்றன. இவற்றை அருமண் தொகுதி என்பர். இதைப்போல 3d கூடு முழுமை பெறாத இரும்புத் தொகுதியும், 4d கூடு முழுமை பெறாத பல்லாடியம் தொகுதியும், 5d கூடு முழுமை பெறாத பிளாட்டினம் தொகுதியும், (5f-6d) கூடுகள் முழுமை பெறாத யுரேனியம் தொகுதியும் பாராகாந்தத் தன்மை பெற்று விளங்குகின்றன.

அருமண் தொகுதி அயனிகள்

அருமண் தொகுதித் தனிம உப்புகள் மூவினைத்திறன் மிக்கதாய் இருக்கின்றன. அதனால் திண்ம நிலையில் இருக்கும் போதும், கரைசலாக இருக்கும்போதும் மூவலகு அயனிக்கப்பட்டு பாராகாந்தப் பண்பைக் கொண்டு திகழ்கின்றன. இவற்றில் பெரும்பாலான அணுக்கள் தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலையில் இருப்பதால் L-S பிணைப்பு சாதகமாக இருக்கின்றது. இதனால் அருமண் தொகுதி அயனிகளுக்குச் செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண் மதிப்பு

$P_{\text{செயலுறு}} = g_J J(J+1)$

J மற்றும் g_J -ன் மதிப்புகளை முறையே ஹண்ட்டு விதி (Hund's rule) மற்றும் லாண்டே தொடர்பு இவற்கைக் கொண்டு மதிப்பிடலாம்.

செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண் மதிப்பிடுதல்

ஹண்ட்டு விதியின்படி அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையில் இருக்கின்ற ஓர் அணுவிற்கு

(1) பௌலியின் தவிர்க்கை விதிக்குஏற்ப, எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சிகள் எல்லாம் ஒன்றிணைந்து S என்ற இயலக்கூடிய பெருமத்தை நல்குகின்றன.

(2) இதைப்போலச் சுற்றுப்பாதை கோண உந்தங்கள் ஒன்றிணைந்து L என்ற பெருமத்தை ஏற்படுத்துகின்றன.

(3) முழுமை பெறாத அகக் கூடுகளுடன் கூடிய அணுவிற்கு

$J = |L-s|$, முழுமை பெறாத அகக்கூடு பாதிக்கும் குறைவாக எலக்ட்ரான்களைப் பெற்றிருந்தால்

$J = |L+S|$ முழுமை பெறாத அகக்கூடு பாதிக்கும் அதிகமாக எலக்ட்ரான்களைப் பெற்றிருந்தால்.

முழுமை பெறாத அகக்கூடு மிகச் சரியாக பாதியளவு எலக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்பட்டிருந்தால் ஹண்ட்டு முதல் விதியின்படி L=0 என்பதால் J=S ஆகும். இவ்விதியைப் பயன்படுத்தி அணுவின் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையைக் கண்டறியமுடியும். எடுத்துக்காட்டாக ce^{3+} (சீரியம்) என்ற அயனி f கூட்டில் ஒரே ஒரு எலக்ட்ரானைப் பெற்றிருக்கின்றது. இதன் l மற்றும் s மதிப்புகள் முறையே

3,1/2 ஆகும். f கூட்டில் மொத்தம் 14 எலக்ட்ரான்கள் இருக்கமுடியும் என்பதால் சீரியத்தில் இக்கூடு பாதிக்கும் குறைவாகவே நிரப்பப்பட்டிருக்கின்றது. ஹண்ட்டு விதிப்படி இதன் J மதிப்பு |L-S|=5/2 நிறமாலையியல்படி இதன் குறியீடு $2F^{5/2}$ $[^{2s+1}SJ]$ இதைப்போல f கூட்டில் இரு எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள பிராசியோடைமியம் $Pr^{3}+$ -ன் J மதிப்பு 4 என்றும், நிறமாலையியல் குறியீடு $3H_4$ என்றும் 6 எலக்ட்ரான்களை உடைய ஈரோப்பியம் Eu^{3+} க்கு இம்மதிப்புகள் முறையே 0, $7F_o$ என்றும் காட்டலாம்.

j - j பிணைப்பில் லாண்டே பிரிதிறன் காரணி

இந்நிலையில் எலக்ட்ரானின் சுற்றுப்பாதை, தற்சுழற்சி கோணஉந்தங்கள் ஒன்றிணைந்து விளைவுக் கோண உந்தத்தைத் தருகின்றது.

$$l_t + s_1 = j_1$$

$$l_2 + s_2 = j_2$$

இந்த j வெக்டார் துயைப் பற்றி சுழற்சி இயக்கத்தில் ஈடுபடுகின்றன.

$$J = j$$

இவ்வியக்கங்களினால் ஏற்படும் காந்தத் திருப்புத் திறனை

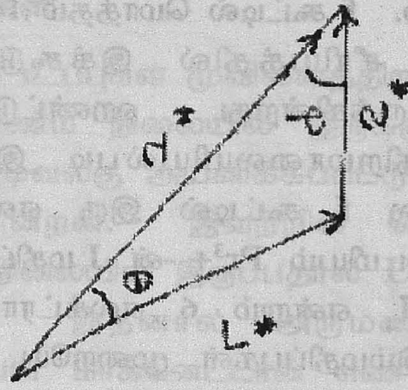
$$M_e = -g_e\, l^*\, \mu_B$$

$$M_s = -g_s\, s^*\, \mu_B$$

$$M_j = -g_j\, j^*\, \mu_B$$

j-திசையில் M_e, M_s-இவற்றின் ஆக்கக்கூறு M_j க்குச் சமமாக இருக்கவேண்டும். எனவே

$$M_j = M_e \cos\theta + M_s \cos\phi$$



படம் 3.12 l*, s* j* வெக்டார்கள்

படம் 3.12லிருந்து

$$s^{*2} = j^{*2} + l^{*2} - 2j^{*}l^{*}\cos\theta$$

அல்லது

$$\cos\theta = \frac{s^{*2} - j^{*2} - l^{*2}}{2j^{*}l^{*}}$$

இதைப்போல

$$l^{*2} = j^{*2} + s^{*2} - 2j^{*}s^{*}\cos\phi$$

அல்லது

$$\cos\phi = -\left(\frac{l^{*2} - j^{*2} - s^{*2}}{2j^{*}s^{*}}\right)$$

$g_e=1$, $g_s=2$ எனக்கொண்டு இம்மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்தால்

$$M_j = -g_j j^* \mu_B \quad \mu_B \frac{-3i^{*2} - s^{*2} + e^{*2}}{2j^*}$$

இது g_j -ன் மதிப்பைத் தருகின்றது.

$$g_j = \frac{3j(j+1) - s(s+1) - e(e+1)}{2j(j+1)}$$

பல எலக்ட்ரான்களின் M_j மதிப்புகளின் J திசையிலான கூறுகளின் கூடுதல் M_J மதிப்பைத் தரும்.

$$M_j = -\Sigma M_j \cos\theta_{jJ}$$

$$= -\mu_B \Sigma g_j j^* \cos\theta_{jJ}$$

இரு அகக்கூடு எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ள ஓர் அணுவிற்கு

$$M_J = -\mu_B [g_{j1} j_1^* \cos(j_1J) + g_{j2} j_2^* \cos(j_2J)] = - g_J J^* \mu_B$$

இதிலிருந்து

$$g_J J^* = g_{j1} j_1^* \cos(j_1J) + g_{j2} j_2^* \cos(j_2J)$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம். கொசைன் விதியைப் பயன்படுத்தி

$$\cos j_1J = \frac{j^{*2} + j_1^{*2} - j_2^{*2}}{2j_1^* J^*}$$

$$\cos j_2J = \frac{j^{*2} + j_2^{*2} - j_1^{*2}}{2j_2^* J^*}$$

இம்மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்தால்

$$g_j = g_{j1} \frac{J(J+1) + j_1(j_1+1) - j_2(j_2+1)}{2J(J+1)} + g_{j2} \frac{J(J+1) + j_2(j_2+1) - j_1(j_1+1)}{2J(J+1)}$$

gj_1, gj_2 இவற்றின் மதிப்புகளைக் கொண்டு g_J -ன் மதிப்பைக் கணக்கிட்டறியலாம். இந்நிலையில் $1<g_J<2$ என்றிருக்கும்.

L-S பிணைப்பில் லாண்டே பிரிதிறன் காரணி

L-S பிணைப்பில் L மற்றும் S வெக்டார்கள் தனித்து J வெக்டாரைப் பற்றிச் சுழற்சி இயக்கத்தில் ஈடுபடுகின்றன. ஓர் எலக்ட்ரானின் சுற்றியக்கக் காந்தத் திருப்புத்திறன்

$M_e = -g_l l \mu_B$ இதில் $g_l = 1$

பல எலக்ட்ரான்களின் சுற்றியக்கக் காந்தத் திருப்புத்திறன்

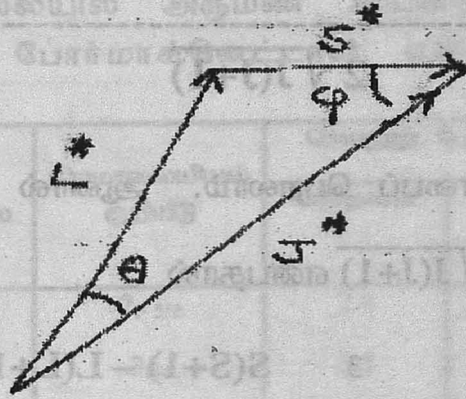
$M_L = M_l$ (L-ன் திசையில் M_l-ன் ஆக்கக் கூறுகள்)

இதைப்போல தற்சுழற்சி இயக்கத்திற்கும் கற்பிக்கலாம்.

$M_s = -g_s s \mu_B = -2s\mu_B$ இதில் $g_s = 2$

$M_S = \Sigma M_s$ (s-ன் திசையில் M_s -ன் ஆக்கக் கூறுகள்)

J-ன் திசையில் இவற்றின் ஆக்கக்கூறுகளின் கூடுதல் M_J ஆகும்.



படம் 3.13 L,S,J வெக்டார்கள்

$$M_j = [M_L \cos(LJ) + M_S \cos(SJ)]$$

$$= -\mu_B [L^* \cos\theta - 2S\cos\phi]$$

படம் 3.13லிருந்து

$$\cos\theta = -\frac{S^{*2} - L^{*2} - J^{*2}}{2 L^* J^*}$$

$$\cos\phi = -\frac{L^{*2} - S^{*2} - J^{*2}}{2 S^* J^*}$$

இம்மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்தால்

$$M_j = \mu_B \frac{L(L+1) - S(S+1) - 3J(J+1)}{2\sqrt{J(J+1)}}$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம். ஆனால்

$M_j = -g_J\mu_B \sqrt{J(J+1)}$ என்பதால்

$$g_J = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

என்ற மதிப்பை g_J க்குப் பெறமுடியும்.

இத்தொடர்புகளின் பயன்பாட்டினைக் கொண்டு எந்தவொரு பாராகாந்த அணுவின் செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண் மதிப்பைக் கணக்கிட முடியும்.

அருமண் தொகுதி அயனிகள் பிணைப்பிற்கு உட்படுவதால்

$$g_J = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}$$

ce^{3+} அயனிக்கு gS=1/2, L=3, J=5/2 என்பதால g_J =6/7 எனவே

$P_{செயலுறு} = g_J\, J(J+1) = 6/7\ (5/2 \times 7/2) = 2.536$

இதைப்போல பிற அயனிகளுக்கும; $P_{செயலுறு}$-ன் மதிப்பைக் கண்டறியலாம்.

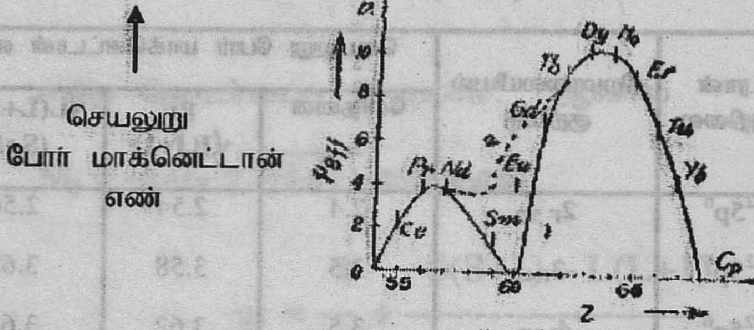
அட்டவணை 3.1

அறைவெப்பநிலையில் அருமண் அயனிகளின் செயலுறு போர்மாக்னெட்டான் எண்

அயனி	எலக்ட்ரான் அமைவுநிலை	நிறமாலையியல் குறியீடு	செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண்		
			சோதனை	$g_J \sqrt{J(J+1)}$	$\sqrt{L(L+1)+S(S+1)}$
Co^{3+}	$4f^1 5a^2 5p^6$	$2_{F\ 5/2}$	2.4	2.54	2.56
Pr^{3+}	$4f^2 5a^2 5p^6$	3_{H4}	3.5	3.58	3.62
Nd^{3+}	$4f^3 5a^2 5p^6$	$4_{I\ 9/2}$	3.5	3.62	3.68
Pm^{3+}	$4f^4 5a^2 5p^6$	$5_{I\ 4}$	--	2.68	2.83
Sm^{3+}	$4f^5 5a^2 5p^6$	$6_{H\ 5/2}$	1.5	0.84	1.60
Eu^{3+}	$4f^6 5a^2 5p^6$	7_{F0}	3.4	0.00	3.45
Gd^{3+}	$4f^7 5a^2 5p^6$	$8_{S\ 7/2}$	8.0	7.94	7.94
Tb^{3+}	$4f^8 5a^2 5p^6$	7_{F6}	9.5	9.72	9.70
Dy^{3+}	$4f^9 5a^2 5p^6$	$6_{H\ 15/2}$	10.6	10.63	10.60
Ho^{3+}	$4f^{10} 5a^2 5p^6$	5_{I8}	10.4	10.60	10.60
Er^{3+}	$4f^{11} 5a^2 5p^6$	$4_{I\ 15/2}$	9.5	9.59	9.60
Tm^{3+}	$4f^{12} 5a^2 5p^6$	3_{H6}	7.3	7.57	7.60
Yb^{3+}	$4f^{13} 5a^2 5p^6$	$3_{F\ 7/2}$	4.5	4.54	4.50

பொதுவாகக் கண்டறியப்பட்ட மற்றும் கணக்கிடப்பட்ட செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண்ணின் மதிப்புகள் ஒத்திருந்தாலும், Sm^{3+} Eu^{3+} அயனிகளில் குறிப்பிடும்படியான முரண்பாடு தென்படுகின்றது. L-S பிரிநிலைகளில் உயராற்றல் நிலைகளின் தாக்கத்தை, கருத்திற்கொள்ள வேண்டும் என்றும், அறைவெப்பநிலைகளில் அடுத்தடுத்த இரு ஆற்றல் நிலைகளுக்கிடைப்பட்ட ஆற்றல் அகலம் $k_B T$-ஐ விட அதிகமாக இருக்கின்றன என்றும், வெப்பநிலை சாராத பாரா காந்தத் தன்மையையும் கருத்திற் கொள்ளவேண்டும் என்றும் இம்முரண்பாடு தெரிவிக்கின்றது.

ஒரு வரைபடத்தின்மூலம் சோதனையால் அறியப்பட்ட மதிப்புகளிலிருந்து, கொள்கைமூலம் நிறுவப்பட்ட மதிப்புகள் எங்ஙனம் விலகி இருக்கின்றன என்பதைக் காட்ட முடியும்.



1. P செயலுறு $= g_J \sqrt{J(J+1)}$

2. $\sqrt{L(L+1) + 4S(S+1)}$

3. சோதனை மதிப்புகள்

படம் 3.14 கண்டறியப்பட்ட மற்றும் கணக்கிடப்பட்ட செயலுறு போர்மாக்னெட்டான் எண் (அருமண் தொகுதி அயனிகள்)

இரும்புத் தொகுதி அயனிகள்

கொள்கை மற்றும் சோதனை மதிப்புகளில் காணப்படும் வேறுபாடுகளை இரும்புத் தொகுதி அயனிகளுக்கும் சோதித்துப் பார்க்கலாம். இதில் 3d அகக்கூடு எலக்ட்ரான்களால் முழுதும் நிரப்பப்படாததால், அணுக்கள் பாராகாந்தத் தன்மையைப் பெற்றிருக்கின்றன.

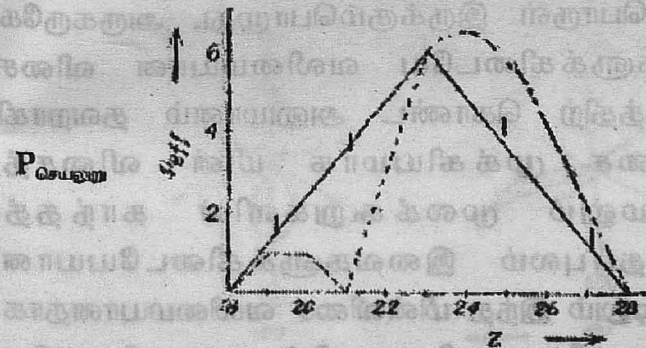
அட்டவணை 3.2

இரும்புத்தொகுதி அயனிகளின் செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண

]	எலக்ட்ரான் அமைவுநிலை	நிறமாலை யியல் குறியீடு	செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் எண்			
			சோதனை	$g_J \sqrt{J(J+1)}$	$2\sqrt{S(S+1)}$	$\sqrt{L(L+1)+4S(S+1)}$
$/^{4+}$	$3d^1 4a^2 4p^6 4d^{10}$	$2_{d\ 3/2}$	1.8	1.55	1.73	3.01
	$3d^2 4a^2 4p^6 4d^{10}$	3_{F2}	2.8	1.63	2.83	4.49
$/^{2+}$	$3d^3 4a^2 4p^6 4d^{10}$	$4_{F3/2}$	3.8	0.77	2.87	5.21
r^{2+}	$3d^4 4a^2 4p^6 4d^{10}$	5_{D0}	4.9	0.00	4.90	5.50
n^{2+}	$3d^5 4a^2 4p^6 4d^{10}$	$6_{S5/2}$	5.9	5.92	5.92	5.92
	$3d^6 4a^2 4p^6 4d^{10}$	5_{D4}	5.4	6.70	4.90	5.50
	$3d^7 4a^2 4p^6 4d^{10}$	$4_{F9/2}$	4.8	6.63	3.87	5.21
	$3d^8 4a^2 4p^6 4d^{10}$	3_{F4}	3.2	5.59	2.83	4.49
	$3d^9 4a^2 4p^6 4d^{10}$	$2_{D5/2}$	1.9	3.55	1.73	3.01

இத்தொகுதியில் அடங்கியுள்ள அயனிகள் g_J J(J+1) மற்றும் L(L+1)+4S(S+1) தொடர்புகள் தரும் மதிப்பீட்டிலிருந்து பெரிதும் வேறுபட்டிருக்கின்றன. சோதனை மூலம் அறியப்பட்ட மதிப்பிலிருந்து கணக்கிடப்பட்ட மதிப்புகள் எங்ஙனம் விலகியுள்ளன என்பதை அறிய முன்பு செய்தது போல ஒரு வரைபடம் வரையலாம்.

எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை



1. சோதனை மதிப்புகள்
2. $J_J \sqrt{J(J+1)}$
3. $2\sqrt{S(S+1)}$

படம் 3.15 கண்டறியப்பட்ட மற்றும் கணக்கிடப்பட்ட செயலுறு மோர்மாக்னெட்டான் எண் மதிப்பு (இரும்பு

தொகுதி அயனிகள்)

வரைபடம் மற்றும் அட்டவணையிலிருந்து சோதனை மூலம் கண்டறியப்பட்ட மதிப்புகள் $P_{\text{செயலுறு}} = 4S(S+1)$ என்ற தொடர்புக்கு ஓரளவு நெருங்கி இருக்கின்றன என்பதை அறியலாம். அதாவது சுற்றியக்கம் காரணமாகச் சிறிதும் கோணஉந்தம் இல்லாமல், காந்தத்தன்மை முற்றிலும் எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சியால் ஏற்படுகின்றது என்ற கருத்திற்கு ஏற்புடையதாக இருக்கின்றது. சுற்றியக்கக் கோணஉந்தம் செயலற்றுப் போவதைத் தணிக்கை (quenching) என்று கூறுகின்றார்கள். இத் தணிக்கை முழுமையாக இருக்கவேண்டும் என்ற கட்டாயமில்லை. அமைப்பில் பகுதித் தணிக்கையும் பிற சூழல்களுக்கு ஏற்ப ஏற்படலாம். இரும்புத் தொகுதி அயனிகளில் இத்தணிதலின் தாக்கம் இருப்பதால், கணக்கிடப்பட்ட மதிப்புகள், கண்டறியப்பட்ட மதிப்புகளிலிருந்து விலகி இருக்கின்றன. வரைபடத்திலிருந்து இரும்புத்தொகுதியின் பிற்பாதி அயனிகள், முற்பாதி அயனிகளைவிட, சுற்றியக்கக் கோண உந்தம் ஓரளவு குறைவாகவே தணிக்கைக்கு உள்ளாகின்றது என்பதைக் காண முடிகின்றது.

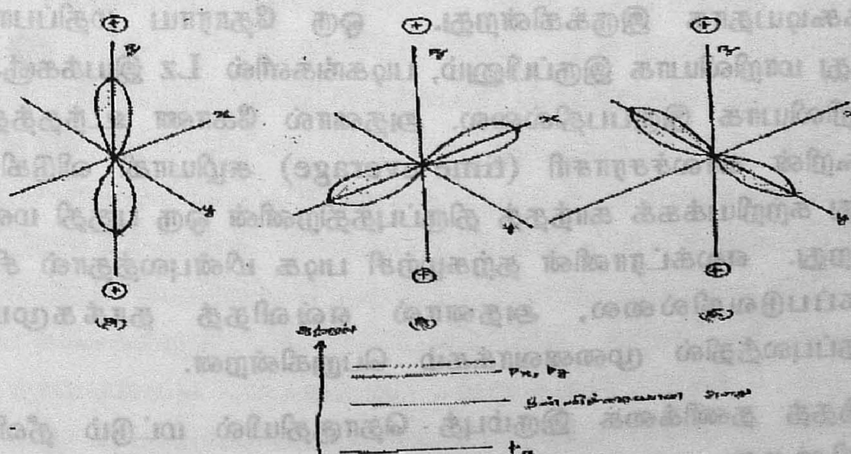
தணிக்கைக்கான விளக்கம்

இத்தணிக்கை நிகழ்வைப் படிகப்புலத்தூண்டலினால் ஏற்படும் பிரிவாக்கத்தின் (crystal field splitting) மூலம் விளக்க முடியும். பாராகாந்தக் கொள்கைகளில் மூலக்கூறுகள் இடைவினைத் தாக்கமின்றித் தனித்தியங்குவனவாகக் கொள்ளப்பட்டுள்ளன. ஒருங்கிணைந்த நிலையில் பொருள் இருக்கும்பொழுது, அருகருகே அமைந்துள்ள மூலக்கூறுகளுக்கிடையே வலிமையான விசை செயல்படுவதால், நாம் கருத்திற் கொண்ட அனுமானம் தவறாகி விடுகின்றது. இந்த விசை முக்கியமாக மின் விசைத் தன்மையேற்றுள்ளது. மேலும் மூலக்கூறுகளின் காந்தத் திருப்புத்திறன், புறக்காந்தப்புலம் இவைகளுக்கிடையேயான இடையீட்டுச் செயலைக் காட்டிலும் இந்த மின்விசை வலிமையானதாக இருக்கின்றது. இதனால் அணுவிடை விசைகளின் ஒரு விளைவே தணிக்கை நிகழ்வு என்று கூறுகிறார்கள்.

பாராகாந்த அயனிகள், பொதுவாக உயர்ஆற்றல் நிலைகளில் இருப்பதைவிடத், தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலைகளில் (அதிக அளவு அது மதிப்பு) இருப்பதை விரும்புகின்றன. இந்நிலையே பாராகாந்த வளிமத்திற்கு ஒரு திருப்புதிறனைத் தருகின்றது. புறக்காந்தப் புலத்தில் (2J+1) நிலைகள், பல்வேறு ஆற்றல் நிலைகளாகப் பிரிபடும் வாய்ப்பு அகற்றப்படாமல், அமைப்பின் இயற்பியல் தன்மையில் குறிப்பிடும்படியான ஒரு வேறுபாடு தோன்றுகின்றது. இந்நிலை பாராகாந்த உப்புகளில் காணப்படுகின்றது. இதில் சீர்குலைவு (degeneracy) படிகப் புலத்தால் ஏற்கனவே ஓரளவு அகற்றப்பட்டு விடுகின்றது.

பாராகாந்த அயனிக்கும், படிகப்புலத்திற்கும் இடையேயான இடையீட்டுச் செயல் இரு முக்கியமான பின் விளைவுகளைக் கொண்டுள்ளது. முதலாவது L,S வெக்டார்களின் பிணைப்பு பெரிதும் துண்டிக்கப்படுகின்றது. அதனால் நிலைகளை அதன் J மதிப்பால் குறிப்பிட வேண்டிய அவசியம் நிலை குலைகின்றது. மேலும் படிகப்புலத்தால் (2L+1) நிலைகள் பல்வேறு ஆற்றல் நிலைகளாகப் பிரிபடுகின்றன. இப்பிரிநிலைகள், சுற்றியக்கக் காந்தத்திருப்புத் திறனின் பங்களிப்பைக் குறிப்பிடும்படியாக மங்கச்செய்து விடுகின்றன.

z-ஆச்சில் இருக்கும் இரு நேர்மின் அயனிகளுக்கிடையே ஒற்றை அச்சுவழிச் செயல்படும் படிகப் புலத்தில், L=1 என்ற சுற்றியக்கக் கோணஉந்தம் கொண்டுள்ள ஒரு பாரா காந்த அணு வைக்கப்பட்டுள்ளதாகக் கொள்வோம். தன்னிச்சையான இயக்க



படம் 3.16 படிகப்புலமும் ஆற்றல் பிரிநிலைகளும்

நிலையில் mL =+1,0,-1 என்று குறிப்பிடப்படுகின்ற மூன்று நிலைகளுமே சமஅளவு ஆற்றலுடையதாக இருக்கும். படிகத்தில் எலக்ட்ரான் திரட்சி படம் 3.16 (அ)ல் காட்டியபடி நேர்மின் அயனிகளுக்கு நெருக்கமாக இருக்கும்போது, அணு தாழ்ந்த ஆற்றலுடையதாக இருக்கின்றது. படம். 3.16 (அ) மற்றும் (இ)ல் காட்டியபடி அமையும்போது கூடுதலான ஆற்றலுடையதாக இருக்கின்றது. ஓர் அச்சைப் பற்றி சீர்மை கொண்டுள்ள புலத்தில் px, py எலக்ட்ரான் செறிவூட்டமிக்க வெளிகள் (orbitals) சீர்குலைவிற்கு ஆளாகின்றன. இவற்றின் ஒப்பீட்டு ஆற்றல் நிலைகள் படம் 3.16 (ஈ)ல் காட்டப்பட்டுள்ளன. மின்புலம் ஓர் அச்சுப் பற்றிய சீர்மையைப் பெறாதிருந்தால், இம்மூன்று நிலைகளும் வெவ்வேறு ஆற்றலுடையவைகளாக இருக்கும்.

p_z எலக்ட்ரான் செறிவூட்டமிக்க வெளிகளைப் பொருத்தமட்டில் அத்திசையில் நிலைப்படுதல் என்பது இல்லை. இதற்குக் காரணம் செயல்படும் மின்புலம் ஒருமையப் புலமாக இல்லாதிருப்பதுதான்.

ஒரு மையம் நோக்கி அணுவில் இருக்கும் மின்புலவெளியில், தொல்லியற்பியலால் வரையறுக்கப்படும் சுற்றுப்பாதைத் தளம் நிலைமாறாதிருக்கின்றது. அதனால் கோண உந்தத்தின் ஆயஅச்சுக்கூறுகள் L_x, L_y, L_z ஆக மூன்றும் மாறாதிருக்கின்றது. குவாண்டம் கொள்கையில் ஒரு கோணஉந்தக் கூறும் (இது பொதுவாக L_z ஆக எடுத்துக் கொள்ளப்படுகின்றது) கோண உந்தத்தின் இருமடியும் மையப் புலத்தில் மாறிலியாக இருக்கின்றன. மைய மற்ற புலத்தில், சுற்றுப்பாதைத்தளம் அதைப்பற்றித் திரும்பக்கூடியதாக இருக்கின்றது. ஒரு தோராய மதிப்பாக L^2 தொடர்ந்து மாறிலியாக இருப்பினும், படிகங்களில் Lz இயக்கஞ்சார்ந்த ஒரு மாறிலியாக இருப்பதில்லை. அதனால் கோண உந்தத்தின் z அச்சுக்கூறின் காலச்சராசரி (time average) சுழியாகி விடுகின்றது. அப்போது சுற்றியக்கக் காந்தத் திருப்புத்திறனின் ஒரு பகுதி மறைந்து போகின்றது. எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சி படிக மின்புலத்தால் சிறிதும் பாதிக்கப்படுவதில்லை, அதனால் எவ்விதத் தாக்கமுமின்றி புறகாந்தப்புலத்தில் முனைவாக்கம் பெறுகின்றன.

காந்தத் தணிக்கை இரும்புத் தொகுதியில் மட்டும் தீவிரமாக இருக்கின்றது. அருமண் தொகுதியில் அப்படியில்லை.

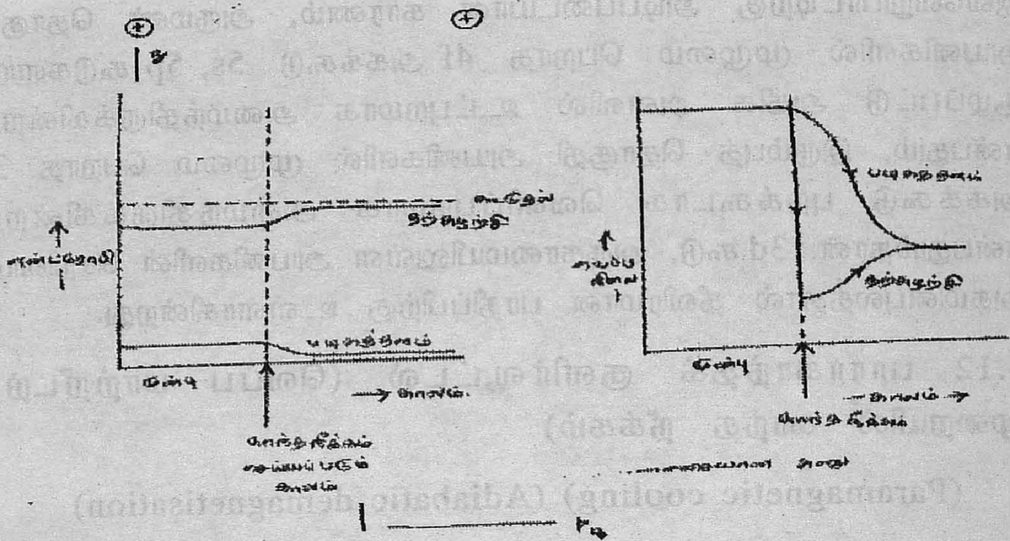
இவ்வேறுபாட்டிற்கு அடிப்படையான காரணம், அருமண் தொகுதி அயனிகளில் முழுமை பெறாத 4f அகக்கூடு 5s, 5p கூடுகளால் சூழப்பட்டு அதிக அளவில் உட்புறமாக அமைந்திருக்கின்றது என்பதும், இரும்புத் தொகுதி அயனிகளில் முழுமை பெறாத 3d அகக்கூடு புறக்கூடாக வெளிப்புறமாக அமைந்திருக்கின்றது என்பதும்தான். 3d கூடு, அருகாமையிலுள்ள அயனிகளின் செறிவான அகமின்புலத்தால் தீவிரமான பாதிப்பிற்கு உள்ளாகின்றது.

3.12 பாராகாந்தக் குளிர்வூட்டல் (வெப்ப மாற்றீடற்ற முறையில் காந்த நீக்கம்)

(Paramagnetic cooling) (Adiabatic demagnetisation)

பாராகாந்த உப்புகளின் ஒரு முக்கியமான பயன் சார்பிலா சுழி வெப்பநிலைக்கு அருகிலுள்ள தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளைப் பெறுவதாகும். இது அவ்வெப்பநிலைகளில் பொருட்களின் பண்புகளை ஆராய்ந்தறியப் பயனளிக்கின்றது.

1டிகிரிகெல்வின் வெப்பநிலைக்கும் கீழான வெப்பநிலைகளைப் பெறும் வழிமுறையில் பாராகாந்தக் குளிர்வூட்டல் நற்பயனளிக்கின்றது. ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் காந்தத் திருப்புத்திறனுடைய துகள்கள் அடங்கிய தொகுதியின் என்ட்ரோபியை (entropy) ஒரு காந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்தித் தாழ்வுறச் செய்யமுடியும் என்ற அடிப்படையில் இவ்வழிமுறை அடங்கியிருக்கின்றது.

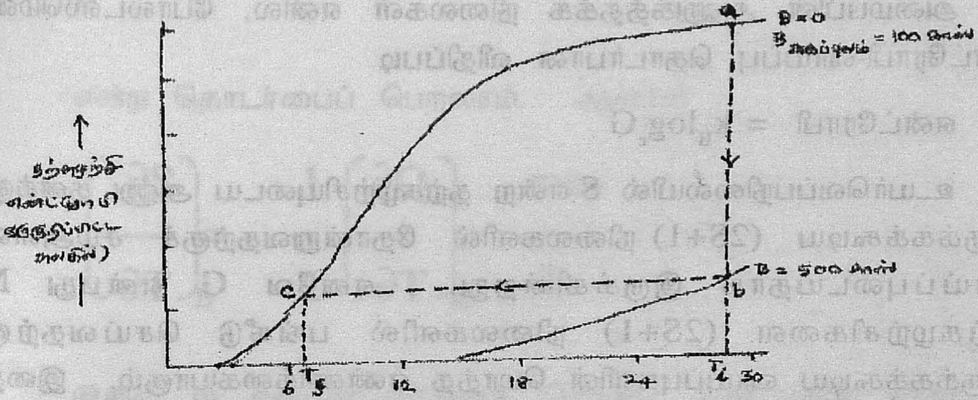


படம் 3.17 வெப்ப மாற்றீடற்ற முறையில் காந்தநீக்கமும், வெப்பநிலை தாழ்வுறுதலும்

ஓர் அமைப்பின் ஒழுங்கின்மையை அதன் என்ட்ரோபி மதிப்பிடக் கூடியதாக இருப்பதால், அதிக அளவிலான ஒழுங்கின்மை அதிக என்ட்ரோபியைத் தரும் என்று முடிவு செய்யலாம். புறகாந்தப்புலத்தில் மூலக்கூறு காந்தங்களின் பகுதி முனைவாக்கத்தினால், ஓர் ஒழுங்கு நிலையைப் பெறுவதாலும், தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் கூடுதலான எண்ணிக்கையில் மூலக்கூறு காந்தங்கள் முனைவாக்கத்தைப் பெறுவதாலும், அமைப்பின் என்ட்ரோபி தாழ்வுறுகின்றது. இப்போது அமைப்பின் என்ட்ரோபியில் மாற்றம் ஏதுமின்றி காந்தப்புலத்தை அகற்றிவிட முடியுமென்றால், புறக்காந்தப்புலம் இருந்தபோது மூலக்கூறு காந்த அச்சுகள் பெற்றிருந்த அதே முனைவாக்க நிலையைத் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் பெற்றிருக்கும். எடுத்துக்கொண்ட பாராகாந்தப் பொருளை வெப்பமாற்றீடற்ற முறையில் காந்தநீக்கம் செய்யும்பொழுது, காந்தத் தன்மைக்குக் காரணமாகும் தற்சுழற்சி அமைப்பின் கூடுதல் என்ட்ரோபி, அமைப்பின் படிகத்தள அதிர்வுப்படிகளின் படிப்படியான மறைவால் பெறப்படுகின்றது. இது படம் 3.17ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. தாழ்ந்த வெப்பநிலை நெடுக்கையில், படிகத்தள அதிர்வின் என்ட்ரோபி மிகவும் புறக்கணிக்கக்கூடிய மதிப்புடையதாக இருக்கும். அதனால் வெப்பமாற்றீடற்ற காந்தநீக்கமுறையில் தற்சுழற்சி அமைப்பின் என்ட்ரோபி ஏறக்குறைய

மாறாதிருக்கின்றது. இந்நிலையில் பெறுவதற்கு அமைப்பு மிகவும் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் 1K நெடுக்கையில் இருக்கவேண்டியது அவசியமாகின்றது.

புறக்காந்தப்புலம் இருக்கும் போதும், அது நீக்கப்பட்டபோதும் சார்பிலா வெப்பநிலை சார்ந்த பொருளின் என்ட்ரோபியை படம் 3.18 புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றது.



சார்பிலா வெப்பநிலை

படம் 3.18 புறக்காந்தப்புலம் இருக்கும் மற்றும் இல்லாதபோது சார்பிலா வெப்பநிலை சார்ந்த என்ட்ரோபி

Ti என்ற தொடக்க வெப்பநிலையில் ஒரு பொருளின்மீது புறகாந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்தி, சமவெப்பநிலையில் காந்தமாக்கத்தைச் செய்யமுடியும். வரைபடம் 3.18ல் இது ab என்ற கோட்டால் காட்டப்பட்டுள்ளது. அப்போது எண்ட்ரோபி தாழ்வுறுகின்றது. புறக்காந்தப்புலத்தை அகற்றி வெப்பமாற்றீடற்ற முறையில் காந்தநீக்கம் செய்யப்படுகின்றது. அப்போது என்ட்ரோபி மாறாமல் வெப்பநிலை தாழ்வுறுகின்றது. இது வரைபடத்தில் bc என்ற கோட்டால் காட்டப்பட்டுள்ளது. சமவெப்பநிலைக் காந்தமாக்கலையும், வெப்பமாற்றீடற்ற காந்த நீக்கலையும் மாறிமாறிச் செய்து 0.001 K என்ற அளவில் சார்பிலாச் சுழிவெப்பநிலையை நெருங்க முடியும்.

N அயனிகள் உடைய ஒரு தொகுதியின் தற்சுழற்சி என்ட்ரோபிக்கான ஒரு தொடர்பைப் பெறுவோம். ஓரளவு உயர்வெப்பநிலையில் இத் தற்சுழற்சி முழுமையாக முனைவாக்கம் பெறாதிருக்கும். அதாவது பொருளின் வெப்பநிலை, தற்சுழற்சியை முனைவாக்கம் செய்ய முயலகின்ற இடையீட்டுச் செயலின் ஆற்றல், k_BT-ன் மதிப்பை வரையறுக்கின்ற θ என்ற ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையைக் காட்டிலும் ஓரளவு கூடுதலாக இருக்கட்டும்.

அமைப்பின் அணுகத்தக்க நிலைகள் எனில், போல்ட்ஸ்மென் என்ட்ரோபி-வாய்ப்பு தொடர்பான விதிப்படி

என்ட்ரோபி $= k_B \log_e G$

உயர்வெப்பநிலையில் S என்ற தற்சுழற்சியுடைய அணு தனக்கு இருக்கக்கூடிய (2S+1) நிலைகளில் தோன்றுவதற்குச் சமஅளவு வாய்ப்புடையதாக இருக்கின்றது. எனவே G என்பது N தற்சுழற்சிகளை (2S+1) நிலைகளில் பங்கீடு செய்வதற்கு இருக்கக்கூடிய வாய்ப்புகளின் மொத்த எண்ணிக்கையாகும். இதை $(2S+1)^N$ என்று கணக்கிடலாம். எனவே தற்சுழற்சி என்ட்ரோபி $R\log_e (2S+1)$ ஆகும். இந்தத் தற்சுழற்சி என்ட்ரோபியின் மதிப்பே புறக்காந்தப் புலத்தால் தாழ்த்தப்படுகின்றது. காந்தப்புலம் (2S+1) நிலைகளை ஆற்றல் வகையால் பிரித்து, தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலையில் தோன்றியிருக்கக்கூடிய தற்சுழற்சிகளின் எண்ணிக்கையை அதிகமாக்குகின்றது.

கொள்கை

B என்ற புறக்காந்தப் புலத்தின் காந்தப்பாயச் செறிவு என்றும் dI என்பது காந்தமாக்கச் செறிவில் ஏற்படும் குறைவு என்றும் கொண்டால், செய்யப்படும் வேலை -BdI ஆகும். எனவே வெப்பஇயக்கக் கொள்கைப்படி

$$dQ = du + Pdv - BdI$$

காந்தநீக்கம் மாறாத அழுத்தத்தில் செய்தால் dv=0 எனலாம். எனவே

$$dQ = du - BdI$$

அல்லது $du = Tds + BdI$

u,s,I இம்மூன்றும் f(x,y) எனக் கருதி, மேக்ஸ்வெல் வெப்ப இயக்கவியல் சமன்பாடுகளை வருவித்ததுபோல ஒரு பொதுச்சமன்பட்டை நிறுவி, x=S என்றும் y=B என்றும் கொண்டு

$$\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S = -\left(\frac{\partial I}{\partial S}\right)_B = \left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_B \Big/ \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம். ஆனால்

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial Q}{\partial T}\right)_B = \frac{mc_B}{T}$$

இதில் m என்பது எடுத்துக் கொண்ட பொருளின் நிறை, c_B என்பது மாறாத காந்தப்புலத்தில் அதன் வெப்பஏற்புத் திறனாகும். எனவே

$$\left(\frac{\partial S}{\partial B}\right)_S = -\frac{T}{mc_B}\left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_B$$

அல்லது

$$\partial T = -\frac{T}{mc_B}\left(\frac{\partial I}{\partial T}\right)_B \partial B$$

எனலாம். வெப்பமாற்றீடற்ற முறையில் காந்தநீக்கம் செய்யும் போது ஏற்படும் வெப்பநிலைத்தாழ்வின் மதிப்பை இது குறிப்பிடுகின்றது.

கியூரி விதிப்படி காந்தஏற்புத்திறன் சார்பிலா வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.

$$\chi = \frac{C}{T}$$

$$\chi = \frac{\mu_o I}{B}$$ என்பதால்

$$I = \frac{CB}{\mu_o T}$$

எனவே

$$\partial T = -\frac{T}{mc_B}\frac{\partial}{\partial T}\frac{CB}{\mu_o T}\,dB$$

T_i என்பது தொடக்க வெப்பநிலை என்றும் T_f என்பது இறுதிவெப்பநிலை என்றும் கொண்டால்

$$T_f - T_i = -\frac{T}{\mu_o mc_B}\int_{B_i}^{B_f} -\frac{CB}{T^2}\,dB = -\frac{C}{2\mu_o mc_B T}[B_f^2 - B_i^2]$$

புறகாந்தப்புலத்தைச் சுழியாக்குவதால்

$B_f = 0$ எனவே $T = \frac{T_f + T_i}{2}$

என்பதால் $T \sim T_i$ என்று கொள்ளலாம்.

$$T_f = T_i - \frac{C}{2\mu_o m c_B T_i} B_i^2 \qquad (3.48)$$

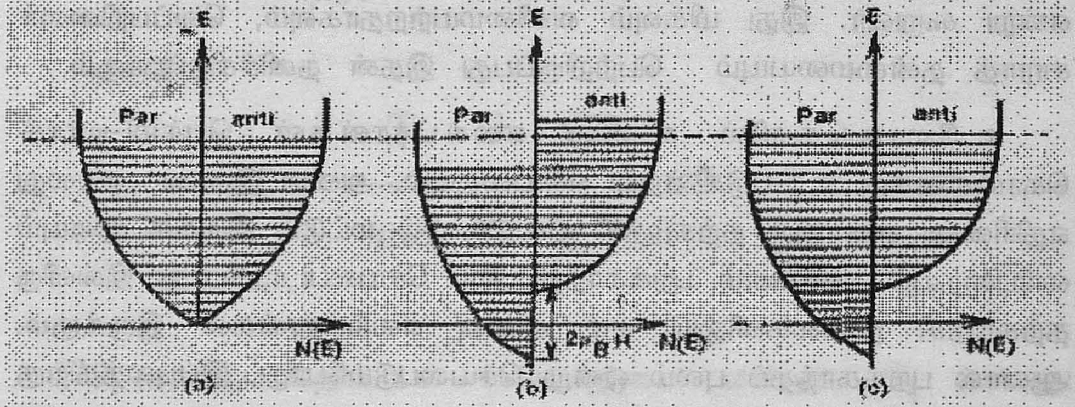
3.13 கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் பாராகாந்தத் தன்மை

இது பற்றி பகுதி 1,5வது அத்தியாயத்தில் விவரிக்கப்பட்டுள்ளது. எனினும் இங்கு பிரிதொரு வழிமுறை மூலம் கட்டற்ற எலக்ட்ரானின் பாராகாந்தத் தன்மை வருவிக்கப்பட்டுள்ளது. அதிக எண்ணிக்கையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களைக் கொண்ட உலோகங்கள், அதன் காரணமாக பாராகாந்தத் தன்மையைப் பெற்றிருக்கின்றன. இதை பௌலி தற்சுழற்சி பாரா காந்தம் (Pauli spin paramagnetism) என்று கூறுவர். இது மிகவும் வலிமையற்றதாகவும், வெப்பநிலைச் சாராத் தன்மையையும் பெற்றிருப்பது இதன் தனிச்சிறப்பாகும்.

உலோகங்களில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் பெர்மி-டிராக் கொள்கைக்கு உட்படுகின்றன என்பதையும், அவை இணை அல்லது எதிரிணை என இரு தற்சுழற்சி நிலைகளில் மட்டும் இருக்க முடியும் என்பதையும் அறிவோம். புறக்காந்தப்புலம் செயல்படாதபோது, இவ்விரு தற்சுழற்சி நிலைகளிலும் சம அளவு எலக்ட்ரான்கள் இருக்கும். ஆனால் புறக்காந்தப் புலம் ஒன்று செயல்படும்போது, இப்புலத்திற்கு எதிரிணையாகத் தற்சுழற்சி கொண்ட எலக்ட்ரான்கள், இணையாகத் தற்சுழற்சி கொண்ட எலக்ட்ரான்களைவிட அதிக ஆற்றலைப் பெறுகின்றன. இதனால் இருவேறு தற்சுழற்சி கொண்ட எலக்ட்ரான்களுக்குக் கிடைக்கக்கூடிய பெரும ஆற்றல் நிலைகள் பிரிக்கப்பட்டு வேறுபடுகின்றன. ஆனால் ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில், இவ்விரு தற்சுழற்சி கொண்ட எலக்ட்ரான்களும் ஒத்த, சமமானபெரும ஆற்றல் நிலையுடன், அதற்குக் கீழுள்ள எல்லா ஆற்றல் நிலைகளும் நிரம்பியவாறு அமையப் பெற்றிருக்க வேண்டும். சில எதிரிணை எலக்ட்ரான்கள், இணை எலக்ட்ரான்களாக மாறினால் மட்டுமே இது நிகழக்கூடும். இதனால் புறக்காந்தப்புலத்தில் எலக்ட்ரான் வளிமத்தில் கூடுதலான எண்ணிக்கையிலுள்ள இணை எலக்ட்ரான்கள் உலோகத்திற்கு ஒரு பாராகாந்தத்தன்மையை வழங்குகின்றன.

புறக்காந்தப்புலம் இல்லாதபோது பெர்மி ஆற்றலுக்குக் கீழ்

உள்ள ஆற்றல் நிலைகள் எலக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்படுகின்றன. B என்ற காந்தப்பாயச் செறிவுடைய ஒரு புறகாந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்த $M_{எலக்ட்ரான்}$ என்ற காந்தத் திருப்புதிறன் கொண்ட இணை எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் $M_{எலக்}$ B அளவு தாழ்வுறுகின்றது. எதிரிணை எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் இதே அளவு அதிகரிக்கின்றது. இதில் $M_{எலக்}$B பெர்மி ஆற்றலைவிட மிகவும் சிறியதாக இருக்கட்டும். காந்தப்புலத்தில் இந்நிலை நிலையற்றது. ஏனெனில் சமநிலைக்கு இரு பகுதிகளும் சமஆற்றல் நிலைவரை நிரப்பப்படவேண்டும். இதனால் எதிரிணை எலக்ட்ரான்கள் சில இணை எலக்ட்ரான்களாக மாற்றம் பெறுகின்றன. படம் 3.19ல் இது தெளிவாகக் காட்டப்பட்டுள்ளது.



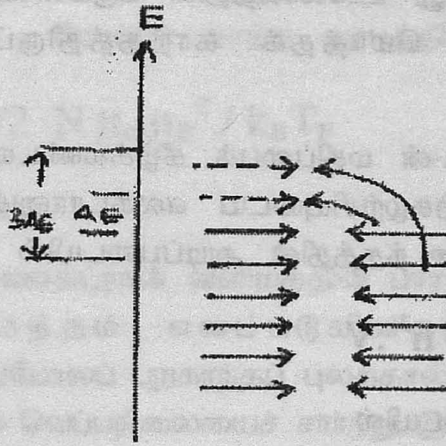
படம் 3.19 புறக்காந்தப் புலத்தில் பெர்மி ஆற்றலுக்கு அருகாமையில் தற்சுழற்சி மாற்றம்

கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களால் உலோகங்களில் ஏற்படும் பாராகாந்தத்தன்மையைக் கணக்கிட, புறக்காந்தப் புலத்தில் நிலைமாறும் எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் கணக்கிட்டறியவேண்டும்.

புறக்காந்தப்புலத்தில் பெர்மி ஆற்றலுக்கு அருகாமையில் ஏற்படும் தற்சுழற்சி மாற்றம் அமைப்பின் ஆற்றலை அதிகரிக்கின்றது. υ எலக்ட்ரான் இணைகள் புறகாந்தப் புலத்தால் பிரிக்கப்பட்டால், அமைப்பு பெறும் கூடுதல் $2\upsilon M_{ஆற்றல்}$ $B_{எலக்}$ எனத் தோன்றும். எலக்ட்ரானின் தற்சுழற்சியால் அதற்கு ஒரு காந்தத்திருப்புத்திறனைத் தருவதால்,

$M_{எலக்}$ = போர் மாக்னெட்டான் = μ_B

நிறைவுற்ற உயர் ஆற்றல் நிலையிலுள்ள எதிரிணை எலக்ட்ரான்கள் நிறைவுறாத் தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலையை நிரப்புமாறு இணை எலக்ட்ரான்களாக மாறும்போது, முதல் எலக்ட்ரான் மாற்றத்தில் ΔE என்ற ஆற்றலும், இரண்டாவது எலக்ட்ரான் மாற்றத்தில் $3\Delta E$ என்ற ஆற்றலும், மூன்றாவது எலக்ட்ரான் மாற்றத்தில் $5\Delta E$ என்ற ஆற்றலும் எடுத்துக் கொள்ளப்படுகின்றன. υ எலக்ட்ரான்கள் இப்படித் தற்சுழற்சி மாற்றத்தால் ஆற்றல்நிலை மாற்றம் பெறும்போது எடுத்துக் கொள்ளப்படும் மொத்த ஆற்றல்



படம் 3.20 தற்சுழற்சி மாற்றமும் ஆற்றல் நிலை மாற்றமும்

இப்படித் தற்சுழற்சி மாற்றத்தால் ஆற்றல் நிலை மாற்றம் பெறும் போது எடுத்துக் கொள்ளப்படும் மொத்த ஆற்றல்

$$[1 + 3 + 5 + \ldots (2v-1)]\,\Delta E = \upsilon^2\,\Delta E$$

எனவே காந்தப்புலத்தில் எலக்ட்ரான் வளிமம் பெறும் மொத்தக் கூடுதல் ஆற்றல்

$$E = -2\upsilon M_{எலக்}\,B + \upsilon^2\,\Delta E$$

சமநிலையில் இந்தத் தற்சுழற்சி மாற்றம் சிறுமமாக இருக்கவேண்டும் என்பதால்

$$dE / d\upsilon = -2M_{எலக்}\,B + 2\upsilon\,\Delta E = 0$$

அல்லது $\upsilon = M_{எலக்} B/\Delta E = B\mu_B / \Delta E$

$E_{சிறுமம்} = (M_{எலக்} B)^2 / \Delta E = (B\mu_\beta)^2 \Delta E$

சமநிலையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களால் உலோகத்திற்குக் கிடைக்கும் பாராகாந்தத் தன்மையின் காந்தத்திருப்புத்திறன்

$M = 2\upsilon\mu_B = 2B\mu_B{}^2 / \Delta E$

வரையறையின்படி ஓரலகுப் பருமனுக்கான பாராகாந்த ஏற்புத்திறன்

$x_{பாரா} = M / H.V = 2\mu_o \mu_B{}^2 / V.\Delta E$

இதில் V என்பது உலோகத்தின் பருமனையும், M அதிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் மொத்தக் காந்தத்திருப்புத் திறனையும் குறிக்கின்றன.

இதில் வரும் Δ-ன் மதிப்பைக் கீழ்க்கண்டவாறு மதிப்பிடலாம். ஒரு வகையான தற்சுழற்சியுடைய எலக்ட்ரானுக்கு இருக்கக்கூடிய ஆற்றல் நிலைகள் உந்தத்தின் அடிப்படையில்

$$dN = 4\pi p^2 dp / h^3 .V$$

ஆற்றலின் அடிப்படையில்

$$dN = 4\pi V\sqrt{2mE}\ mdE / h^3$$

பெர்மி ஆற்றல் நெடுக்கையில் அடுத்தடுத்த ஆற்றல் நிலைகளுக்கு dN=1 எனவே

$$dE = (h^3/v)\ (1/4\pi m)\ 1/\sqrt{2m}\ .E_F{}^{-1/2}$$

சார்பிலாச் சுழிவெப்பநிலையில் பெர்மி ஆற்றல்

$$E_{Fo} = h^2/2m\ (3N/8\pi V)^{2/3}$$

$E_F = E_{Fo}$ என்ற தோராயத்தில்

$$\Delta E = (4/3)\ (E_{Fo}/N)$$

எனவே

$$x_{பாரா} = 3/2\ D\mu_o \mu_B^2 / E_{Fo}$$

இதில் D = N/V ஆற்றல் நிலைகளின் செறிவாகும். E_{Fo}-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$X_{பாரா} = \mu_o\mu_B^2 . m/h^2 .4\pi (3D/\pi)^{1/3} \quad (3.49)$$

$E_{Fo} = k_B T_F$ என்பதால்

$$x_{பாரா} = 3/2\ D\mu_o \mu^2_B / k_B T_F$$

என்றும் நிறுவலாம். இதில் T_F என்பது பெர்மி வெப்பநிலையாகும். மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனை

$$x_{மோலார்} = 3/2\ N \mu_o \mu_B^2 / k_B T_F \quad (3.51)$$

என்று வருவிக்கலாம்.

சீர்குலைவுற்ற எலக்ட்ரான் வளிமத்தின் பாராகாந்தத் தன்மையே பௌலி பாராகாந்தம் எனப்படுகின்றது. இது டயா காந்தத்தன்மையைப்போலப் புறகாந்தப் புலத்தால் தூண்டப்படுகின்றது. பௌலி பாராகாந்தம் வெப்பநிலையைச் சார்ந்து இருப்பதில்லை. பெர்மி வளிமத்தின் பாராகாந்தத் தன்மையின் அளவு, திண்ம மற்றும் நீர்மப் பொருளின் டயாகாந்தத் தன்மையின் நெடுக்கையில் இருக்கின்றது.

லாண்டு டயாகாந்தம் (Landau Diamagnetism)

கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களுக்குப் பௌலி பாரா காந்தம் தவிர்த்து லாண்டு டயாகாந்தமும் உள்ளது. இது பௌலி பாரா காந்தத்தின் மதிப்பில் மூன்றில் ஒரு பங்காகவும், எதிர்குறியுடையதாகவும் உள்ளது.

$$x_2 = -1/3 x_p$$

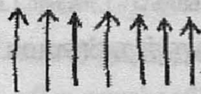
புறக்காந்தப்புலம் ஏதும் இல்லாத நிலையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களுக்குக் குவாண்டம் ஆற்றல் நிலைகள் இல்லை. ஆனால் புறக்காந்தப்புலம் சுழியாக இல்லாதபோது அவை தோன்றுகின்றன.

கட்டற்ற எலக்ட்ரான்மீது லாரன்ஸ் விசை செயல்படுவதாகக்

கொள்வோம். இது மின் மற்றும் காந்த விசைகளின் கூடுதலாகும். மின்விசையால் எலக்ட்ரான் மின்புலத்திசைக்கு இணையாக எடுத்துச் செல்லப்படுகின்றது. காந்தவிசையால், எலக்ட்ரான் காந்தப்புல அச்சைப்பற்றி ஒரு குறிப்பிட்ட அதிர்வெண்ணுடன் சுற்றுகின்றது. இதை சைக்ளோட்ரான் அதிர்வெண் என்பர். இதனால் புறகாந்தப்புலத்தில் சுருள்வில் போன்ற பாதையில் கட்டற்ற எலக்ட்ரான் இயங்கிச் செல்ல, அதன் பொருட்டு அவ்வமைப்பில் ஒரு வகை டயாகாந்தம் தூண்டப்படுகின்றது. இதையே லாண்டு டயாகாந்தம் என்பர். இது பௌலி பாரா காந்தத் தன்மையின் அளவைவிடக் குறைவாக இருப்பதால், உலோகங்களின் மொத்தக் காந்தப்பண்பு பாரா காந்தமாகவே இருக்கின்றது எனலாம்.

3.14 பொருட்களின் பெரோகாந்தத்தன்மை

பாராகாந்தப் பொருட்கள் தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளிலும் உயர் காந்தப் புலங்களிலும் காந்தமாக்கச் செறிவு தெவிட்டு நிலையை எய்தப்பெறும் என்று முன்பு பார்த்தோம். ஆனால் இடைநிலைத்தனிம உலோகங்களான இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் போன்ற பொருட்கள் சாதாரண வெப்பநிலைகளிலும், குறைந்த காந்தப்புலங்களிலும் கூடத் தெவிட்டு நிலையை எட்டி விடுகின்றன. மேலும் பாராகாந்தப்பொருட்களில் புறகாந்தப்புலத்தை நீக்கஞ் செய்யும்போது வெப்பக் கிளர்ச்சியின் ஆளுகையால் அதன் காந்தத் தன்மை சுழியாகி விடுகின்றது. ஆனால் பெரோ காந்தப் பொருட்களில் புறக்காந்தப்புலம் நீக்கப்படும்போது, குறிப்பிடும்படியான அளவில் காந்தத்தந்மை அகற்றப்படாமல் எஞ்சி நிற்கின்றது. எனவே பொருளில் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் (spontaneous magnetisation) இயற்கையாகவே அமைந்திருக்கின்றது எனக் கருதவேண்டிய அவசியம் எழுகின்றது. இத்தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம், அமைப்பிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சியும், காந்தத் திருப்புத்திறனும் ஓர் ஒழுங்கு முறையில் படிகத்தில் இருப்பதைப் போல அணி வகுத்தக் கொண்டிருக்கலாம் என்பதைத் தெரிவிக்கின்றது. உண்மையில் இந்த அணிவகுப்பில் காணப்படும் சிறிய மாற்றங்கள் அல்லது வேறுபாடுகள், பெரோகாந்தப் பண்பை மூன்று வகைக்கு உட்படுத்தியிருக்கின்றன.









படம் 3.21 எலக்ட்ரான் தற்சுழற்சி அணியும் பெரோகாந்தப் பண்பும்

பெரோகாந்தப் பண்புகள்

பெரோ காந்தத்தின் சில இயற்பியல் பண்புகள் பின்வருமாறு.

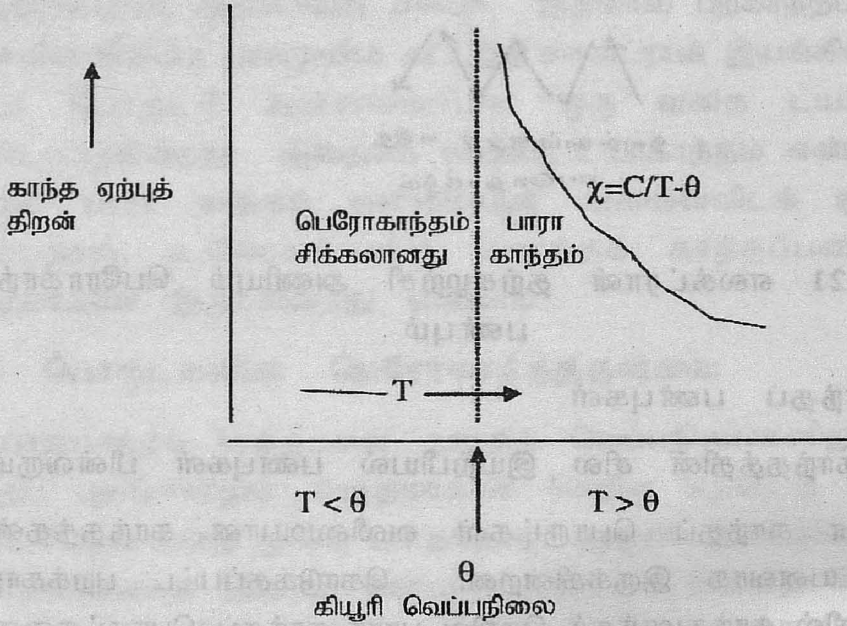
1. பெரோ காந்தப் பொருட்கள் வலிமையான காந்தத்தன்மை உடையனவாக இருக்கின்றன. கொடுக்கப்பட்ட புறக்காந்தப் புலத்தில் காந்தமாக்கச் செறிவு பாரா காந்தப் பொருட்களைவிட பெரோகாந்தப் பொருட்களில் 10^6 மடங்கு அதிகமானதாக இருக்கின்றது.

   காந்தப்பாயச் செறிவு வெளிஊடகத்தைவிட பெரோ காந்தப்பொருட்களில் அதிகம் என்பதால் இவற்றிற்கு காந்த உட்புகுதிறன் மிகவும் அதிகம். காந்தமாக்கச் செறிவு அதிகம் என்பதால் காந்த ஏற்புத்திறனும் அதிகம். புறக்காந்தப்புலத்தை நீக்கினாலும் இது தன் காந்தத் தன்மையை இழப்பதில்லை. அதனால் பெரோ காந்தப்பொருட்களை மட்டுமே நிலையான காந்தங்களாக இருக்குமாறு காந்தமாக்கம் செய்ய முடிகின்றது.

2. பெரோ காந்தப் பொருட்களில் காந்தமாக்கச் செறிவு, புறக்காந்தப் புலச்செறிவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதில்லை. மேலும் ஒரு குறிப்பிட்ட புறகாந்தப்புலச் செறிவிற்கு காந்தமாக்கச் செறிவு ஒற்றை மதிப்புடையதாக இருப்பதுமில்லை.

3. பெரோ காந்தப் பொருட்களில் காந்த ஏற்புத்திறன் வெப்பநிலை மற்றும் புறக்காந்தப் புலச்செறிவு இவற்றைச் சார்ந்திருந்தாலும் எளிய விதிகளுக்கு உட்படுவதில்லை உயர்வெப்பநிலையில்

பெரோ காந்தம், பாராகாந்தமாக மாறிவிடுகின்றது. இவ்வெப்பநிலையை கியூரி வெப்பநிலை என்பர். இவ்வெப்பநிலையில் பொருளின் பெரோ காந்தத்தன்மையில் குறிப்பிடும்படியான மாற்றம் ஏற்படுகின்றது.



படம் 3.22 பெரோ-பாரா காந்த மாற்றம்

உயர் வெப்பநிலையில் எல்லாப் பெரோ காந்தப் பொருட்களும் பாரா காந்தமாக மாறினாலும், எல்லாப் பாரா காந்தப் பொருட்களும் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் பெரோ காந்தமாக இருப்பதில்லை.

வரைபடம் 3.22லிருந்து நாம் ஓர் இயற்பியல் உண்மையைத் தெரிந்து கொள்ளமுடிகின்றது. கியூரி வெப்பநிலையில் மூலக்கூறு அகப்புலம், வெப்பக் கிளர்ச்சி இயக்கத்தைக் கட்டுப்படுத்த இயலாமல் பாரா காந்தமாக மாறிவிடுகின்றது. அதனால் மூலக்கூறு அகப்புலத்தின் செறிவை, அப்புலத்தில் காந்த மூலக்கூறின் நிலையாற்றல், கியூரி வெப்பநிலையில் வெப்பக் கிளர்ச்சி ஆற்றலுக்குச் சமம் எனக் கொண்டு கண்டறியலாம்.

$$M_{\text{அணு}} \ B_{\text{செயலுறு}} = k_B\theta$$

4. பெரோ காந்தப் பொருளில் ஒரு பகுதியிலுள்ள காந்த மூலக்கூறுகள் அனைத்தும் ஒரு திசை நோக்கி முனைவாக்கம்

பெற்றிருக்கின்றன. ஒவ்வொரு காந்த மூலக்கூறும், அப்பகுதியிலுள்ள காந்த மூலக்கூறுகளின் சராசரி காந்தப்புலத்தில் செயல்படுவதாகக் கொண்டு இதை நியாயப்படுத்தலாம். புறக்காந்தப்புலம் இல்லாதபோதும், பகுதிவாரியாக முனைவாக்கம் பெற்ற காந்த மூலக்கூறுகள் ஓர் அகக்காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவித்துத் தூண்டலற்ற காந்தத் தன்மையைத் தக்க வைத்துக் கொள்கின்றது. இந்த அகக் காந்தப்புலத்தை வெயில் மூலக்கூறுப்புலம் என்பர்.

9.15 வெயிஸ் பெரோகாந்தக் கொள்கை

பொருட்களின் பெரோ காந்தத்தன்மையை விளக்குவதற்கு வெயிஸ் என்பார் மூலக்கூறு காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவித்து, அதன் அடிப்படையில் ஒரு கொள்கையை நிறுவினார். இக்கொள்கை இரு அனுமானக் கோட்பாடுகளை அடிப்படையாக் கொண்டுள்ளது.

1. ஒரு பெரோ காந்தப்பொருள் பல சிறுசிறு பகுதிகளாகப் பிரிக்கப்பட்டு, ஒவ்வொரு பகுதியிலும் உள்ள காந்த மூலக்கூறுகள் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கத்தினால் ஒரு திசைநோக்கி முனைவாக்கம் பெறுகின்றன. இச்சிறுபகுதியை நாம் காந்தவயல் (domain) என அழைக்கலாம். பொருளின் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கச் செறிவு அதிலுள்ள காந்தவயல்களின் காந்தத் திருப்புத் திறன்களின் வெக்டார் கூடுதலாகும்.

2. காந்த வயலுக்குள் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம், மூலக்கூறுகளால் தோற்றுவிக்கப்படுகின்ற அகக் காந்தப்புலத்தினால் ஏற்படுகின்றது. இது தூண்டப்படும் காந்தமாக்கச் செறிவிற்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. அதாவது

மூலக்கூறு புலம் $(B_i) \alpha\, I$

அல்லது $B_i = \lambda I$

செயலுறு காந்தப்புலம், புறகாந்தப்புலம் மற்றும் மூலக்கூறு புலம் இவற்றின் கூடுதல் என்பதால்

$$B_{\text{செயலுறு}} = B + \lambda I$$

இதில் λ என்பது வெப்பநிலை சாராத ஒரு மாறிலி. இதை வெயிஸ் புல மாறிலி என்பர்.

ஒரு மோலார் செறிவுள்ள பெரோ காந்தப்பொருளில் ஐே அவகாட்ரோ எண் எண்ணிக்கையில் மூலக்கூறு காந்தங்கள் இருக்கும் என்பதால், அதன் காந்தமாக்கச் செறிவு

$$I = [NM^2_{அணு}\, B_{செயலுறு} / 3k_BT] = NM^2_{அணு} / 3k_BT\,(B + \lambda I)$$

அல்லது

$$I = [NM^2_{அணு}\; B / 3k_BT] / [1 - \lambda NM^2_{அணு} / 3k_BT]$$

$$X_{மோலார்} = I / H = \mu_o NM^2_{அணு} / 3k_BT / [T - \lambda NM^2_{அணு} / 3kB]$$

$$= (\mu_o I_s^2 / 3R) / (T - \lambda N^2 M_{அணு}^2 / 3R)$$

இது C/T-θ என்ற அமைப்பில் இருப்பதாகக் கருதலாம். இதை ஒப்பிட்டு

கியூரி மாறிலி $C = \mu o(N M_{அணு})^2 / 3R$ என்றும், கியூரி வெப்பநிலை $\theta = \lambda\; N^2 M_{அணு}^{\;2} / 3R$ என்றும் பெறலாம். இதுவே கியூரி வெயிஸ் விதி எனப்படுகின்றது. $T = \theta$ எனில் $X_{மோலார்} \to \infty$ வெப்பநிலை கியூரி வெப்பநிலைக்குக் கீழாக இருக்கும்போது $T<\theta$, இத் தொடர்பு செயலற்றதாகி விடுகின்றது. இந்நிலையில் பொருள் பெரோ காந்தமாகத் திகழ்கின்றது. $T>\theta$ என்ற நிலையில் பெரோ காந்தப்பொருள் பாரா காந்த நிலையில் இருக்கின்றது. மூலக்கூறு புலத்தில் காந்த மூலக்கூறுகள் பெறும் ஆற்றல் வெப்ப கிளர்ச்சியைத் தன் ஆளுகைக்குள் வைத்திருக்கும் தன்மையின் எல்லையை வரையறுக்கக் கூடியதாக θ இருக்கின்றது.

தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனை

பெரோகாந்தப் பொருளில் உள்ள ஒவ்வொரு காந்தவயலும், மூலக்கூறு அகப்புலத்தினால் தெவிட்டிய நிலையில் இருக்கின்றன. இது தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலாகும்.

லாஞ்செவின் பாரா காந்தக் கொள்கைப்படி, காந்தமாக்கச் செறிவிற்கும், அதன் தெவிட்டிய செறிவிற்கும் உள்ள தகவு லாஞ்செவின் சார்பாகும். அதாவது

$$I = I_s\, L_{(a)} = I_s\,(\text{Cot ha} - 1/a)$$

இதில்

$$a = M_{\text{அணு}}\ B_{\text{செயலுறு}} / k_B T$$

அதாவது

$$I / I_s = L(a) \qquad (3.52)$$

புறக்காந்தப்புலம் சுழியெனில்

$$B_{\text{செயலுறு}} = B_i = \lambda I.$$ எனவே

$$a = M_{\text{அணு}} \lambda I / k_B T = I_s M_{\text{அணு}}\ \lambda / k_B T\ .\ I / I_s$$ என்பதால்

$$a = I_s^2 \lambda / RT\ (I / I_s)$$

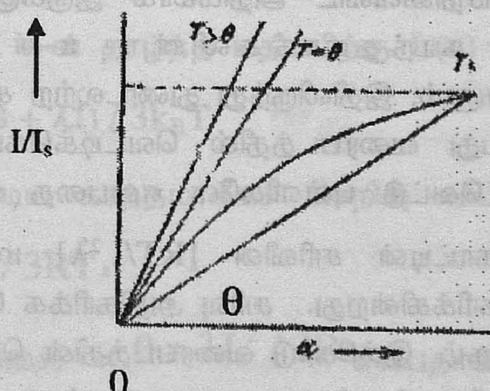
அல்லது

$$I / I_s = [RT / I_s^2 \lambda]\ (a) \qquad (3.53)$$

இத்தொடர்போடு லாஞ்செவின் சமன்பாட்டையும் எடுத்துக்கொண்டு தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனையைப் பெறமுடியும்.

இவ்விரு சமன்பாடுகளின் உடனிகழ்வுக்கான தீர்வைப் பெறுவதற்கு முன்னர் நாம் அதன் வரம்பு நிலையைப் பற்றி அறிந்து கொள்ளவேண்டும். a -ன் மதிப்பு அனந்தத்தை நெருங்கும்போது $T \to 0$ என்பதால் $L(a) \to 1$ அதாவது வெப்பநிலை சுழியாகும் போது காந்தமாக்கச் செறிவு Is என்ற பெருமத்தை எட்டுகின்றது.

I / I_s க்கும் a -ன் மதிப்பிற்கும் (3.52) மற்றும் (3.53) ஆகிய இரு சமன்பாட்டிற்கு ஏற்ப ஒரு வரைபடம் குறிக்கலாம்.



படம் 3.23 தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனை

வரைபடம் 3.23ல் வளைகோடு லாஞ்செவின் சமன்பாட்டால் நிறுவப்பட்ட மதிப்பையும், நேர்கோடு வெயிஸ் சமன்பாட்டால் நிறுவப்பட்ட மதிப்பையும் குறிக்கின்றன. இவ்விரு வரைகோடுகளும் வரைபடத்தின் ஆய மையத்திலிருந்து தொடங்குகின்றன. வெயில் கோட்டின் சரிவு [$RT / I_s^2 \lambda$] ஆகும்.

எந்த வெப்பநிலையிலும், இத்தகைய பொருளின் காந்தப் பண்பினை இவ்விரு சமன்பாடுகளையும் விடுவிப்பதின்மூலம் பெற முடியும். இந்த இரு வரைகோடுகளும் ஆயமையத்திலும் A என்ற புள்ளியிலும் வெட்டிக் கொள்கின்றன. எனவே இரு சமன்பாடுகளுக்கும் பொருந்தும் பொதுவான மதிப்புகளை இவ்விரு வெட்டுப்புள்ளிகளும் கொடுக்கும் என்றாலும் ஆயமையத்தில் I / I_s ன் மதிப்பு சுழியாகும். எனவே இம்மதிப்புப் பொருந்தாது. மற்றொரு மதிப்பை A புள்ளி தருகின்றது. தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலின் உறுதிச் சமநிலையாக இப்புள்ளி தரும் I / I_s மதிப்பைக் கருதலாம். A என்ற வெட்டுப்புள்ளியைத் தவிர்த்து வேறு எந்தப் புள்ளிகளும் உறுதிசமநிலையை ஏற்படுத்துவதில்லை.

எடுத்துக்காட்டாக ஒரு காந்தவயல், துண்டலற்ற காந்தமாக்களின் வரைபடத்தில் Y என்ற புள்ளி குறிப்பிடும் நிலையிலருந்தால் துண்டலற்ற காந்தமாக்கல் செறிவு அதே அளவு புறகாந்தப்புலத்தாலான காந்தமாக்கல் செறிவைவிடக் குறைவாக இருக்கும். எனவெ சமநிலை பெறவேண்டி துண்டலற்ற காந்தமாக்கலின் மதிப்பையும் a-ன் மதிப்பையும் அதிகரித்துக்கொள்ளும். இதைப்போல ஓ என்ற புள்ளியில் துண்டலற்ற காந்தமாக்கல் செறிவு அதெ அளவு புறகாந்தப் புலத்தாலான காந்தமாக்கல் செறிவைவிட அதிகமாக இருக்கும். சமநிலை நாடி துண்டலற்ற காந்தமாக்கலின் a-ன் மதிப்பையும் குறைத்துக்கொள்ளும். இதிலிருந்து துண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனை என்பது வரைபடத்தில் வெட்டிக்கொண்டு சுழியில்லாத மதிப்பைத்தரும் வெட்டு புள்ளிகளே என்பதை உணரலாம்.

வெயிஸ் கோட்டின் சரிவின் [$RT/I_s^2\lambda$] மதிப்பு வெப்பநிலை அதிகரிக்க அதிகரிக்கின்றது. சரிவு அதிகரிக்க வெயிஸ் வரைகோடு நிமிர்வாய் இருக்கும். இக்கோடு வரைபடத்தின் தொடக்கத்திலிருந்து, லாஞ்செவின் கோட்டிற்கு வரையப்பட்ட தொடுகோட்டுடன் பொருந்தினாலும், அல்லது அதற்கும் அப்பாற்பட்ட சரிவு

கொண்டிருந்தாலும் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் நிகழாது. எனவே தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் ஏற்பட நேர்கோட்டின் சரிவு ஆயமையத்திலிருந்து லாஞ்செவின் வரைகோட்டிற்கு வரையப்பட்ட தொடுகோட்டின் சரிவைவிடக் குறைவாக இருக்கவேண்டும்.

கியூரி வெப்பநிலைக்கும் வெயிஸ் மாறிலிக்கும் உள்ள தொடர்பு:

கியூரி வெப்பநிலையில் $(T=\theta)$ இவ்விரு கோடுகளும் ஒன்றிணைகின்றன. a-ன் மதிப்பு குறைவாக இருக்கும்போது ஆய மையத்திற்கு அருகில் லாஞ்செவின் கோட்டின் மதிப்பும், வெயிஸ் கோட்டின் மதிப்பும் சமம்.

$$a / 3 = (R\theta / I_s^2 \lambda)\ a$$

எனவே

$$\theta = I_s^2 \lambda / 3R \qquad (3.54)$$

இத்தொடர்பு கியூரி வெப்பநிலை, வெயிஸ் மாறிலிக்கு நேர்விகிதத் தொடர்பில் இருக்கின்றது என்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.

வெயிஸ் மாறிலி

வெயிஸ் மாறிலியின் மதிப்பையும் அளவிட்டறிய முடியும். கியூரி வெப்பநிலையில் பெரோகாந்தப் பொருளின் காந்தத் தன்மையை அளவிட்டறிவதின் மூலம் வெயிஸ் மாறிலியைக் கணக்கிடலாம். இந்நிலையில் அகப்புலத்தின் மதிப்பு, புறகாந்தப் புலத்திலிருந்து அதிக அளவில் மாறுபட்டதாக இருக்காது.

$$I / I_s = L(a)$$

என அறிவோம். a-ன் தாழ்ந்த மதிப்பிற்கு $L(a) = a/3$ என்பதால்

$$I / I_s = M_{அணு} (B + \lambda I) / 3k_B T$$

இதில் I_s = தெவிட்டிய காந்தமாக்கச் செறிவு $=NM_{அணு}$ எனவே

$$I = I_s^2 (B + \lambda I) / 3RT$$

கியூரி வெப்பநிலை = $\theta = \lambda I_s^2 / 3R$ என்பதால்

$$I = \theta / T\ (B + \lambda I) / \lambda$$

அல்லது $\lambda I / B = \theta/(T-\theta)$

$\mu_o I / B = \chi$ என்பதால்,

$$\lambda = (\mu_o/\chi)\ (\theta / T - \theta) \qquad (3.55)$$

கியூரி வெப்பநிலைக்கருகில் பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனைக் கண்டறிவதின்மூலம் வெயிஸ் மாறிலியை மதிப்பிடலாம்.

வெப்பநிலை சார்ந்த காந்தமாக்கம்

$d / da\ (I / I_s)$ - ன் மதிப்பு படம். 3.23ல் வெயிஸ் கோடுகளின் சரிவின் மதிப்பைக் குறிப்பிடுகின்றது.

$d / da\ (I / I_s) = \tan\theta = 1/3\ (T/ \theta)$

$T<\theta$ என்ற நிலையில் $\tan\theta < 1/3$

I/I_s -ன் மதிப்பு T/θ -ன் மதிப்பைச் சார்ந்திருப்பதால்

$I/I_s = f\ (T/\theta\ )$

என்று கூறலாம்.

புறக்காந்தப்புலம் சுழி எனில் $B_{செயலுறு} = \lambda\ I$, லாஞ்செவின் பாராகாந்தக் கொள்கைப்படி

$$I / I_s = L(a)$$

இதில்

$a = M_{அணு}\ B_{செயலுறு} / k_B T$ எனவே $B_{செயலுறு} = a\ k_B T / M_{அணு} = \lambda I$

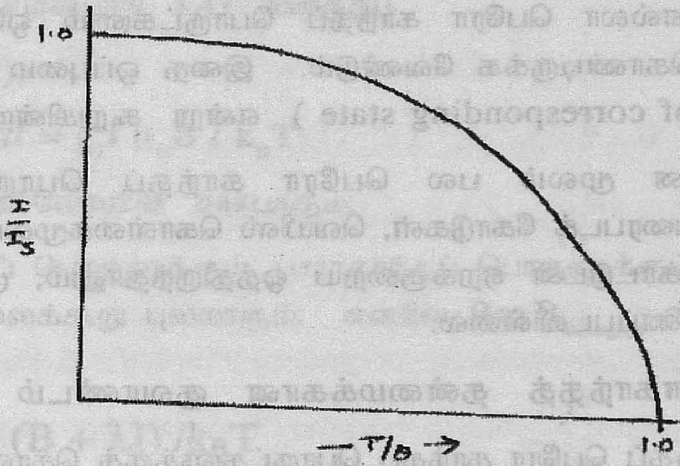
இதிலிருந்து $I = a k_B T / \lambda M_{அணு}$

$I / I_s = N M_{அணு}$ என்பதால்

$$I / I_s = a / 3\ .\ (T / \theta) \qquad (3.56)$$

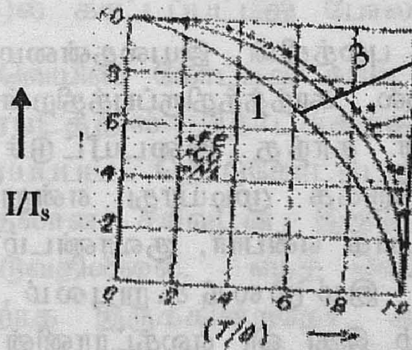
இதிலிருந்து I / I_s என்பது T/θ -ன் -ன் மதிப்பைச் சார்ந்திருக்கின்றது என்று கூறலாம். I/I_s க்கும், T/θ விற்கும் ஒரு வரைபடம் வரைந்து இக்கருத்தை மேலும் உறுதிப்படுத்த முடியும்.

T=0 எனில் $I/I_s = 1$ அதாவது காந்தமாக்கச் செறிவு தெவிட்டு நிலையை அடைகின்றது. $T=\theta$ எனில் $I/I_s = 0$ தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் மறைந்து விடுகின்றது.



படம் 3.24 I/I - T/θ வரைபடம்

T=0 எனில் $f(T/\theta)\rightarrow 1$ என்றும் $T=\theta$எனில் $f(T/\theta)\rightarrow 0$ என்றும் அறிவோம். எனினும் $f(T/\theta)$ க்கு ஒரு திட்டவட்டமான (T/θ) சார்ந்த தொடர்பைப் பெறுவது எளிதில்லை. ஆனால் I/I_s ன் மதிப்பை எந்தவொரு குறிப்பிட்ட T/θ -ன் மதிப்பிற்கு (3.23) வரைபடத்தின் வெட்டுப்புள்ளியிலிருந்து கண்டறியமுடியும். I/I_s ன் மதிப்புகளையும் T/θ -ன் மதிப்புகளையும் கொண்டு ஒரு வரைபடம் வரையலாம். இவ்வரைபடக் கோட்டை, சோதனைமுலம் பெறப்பட்ட மதிப்புகளோடு ஒப்பிட்டு, இதன் தொடர்பை மேலும் ஆராயலாம்.



1. லாச்சுவின் சமன்பாட்டைக்கொண்டு பெறப்பட்ட வெட்டுப்புள்ளிகள்
2. மாக்டினடைட் (சோதனை மதிப்புகள்)
3. நிக்கல் (சோதனை மதிப்புகள்)

படம் 3.25 I/I க்கும் T/ -க்கும் உள்ள வரைபடம் (சோதனை மற்றும் கொள்கை)

இவ்வரைபடத்தில் a-ன் மதிப்பு இடம் பெறாததால் I/I_s க்கும், T/θ -க்கும் வரையப்பட்ட இப்படம் எல்லா பெரோகாந்தப் பொருட்களுக்கும் பொருந்தக்கூடிய ஒரு பொதுவரைபடமாக இருக்கின்றது. வெயிஸ் கொள்கைப்படி ஒரு குறிப்பிட்ட T/θ மதிப்பிற்கு எல்லா பெரோ காந்தப் பொருட்களும் ஒரேயளவு I/I_s மதிப்பைக் கொண்டிருக்க வேண்டும். இதை ஒப்புமை நிலைகளின் விதி (law of corresponding state) என்று கூறுகின்றார்கள்.

சோதனை மூலம் பல பெரோ காந்தப் பொருட்களுக்குப் பெறப்பட்ட வரைபடக் கோடுகள், வெயிஸ் கொள்கைமூலம் பெறப்பட்ட வரைபடக் கோட்டுடன் ஏறக்குறைய ஒத்திருந்தாலும், முழுமையான ஒப்புமை காணப்படவில்லை.

3.16 பெரோகாந்தத் தன்மைக்கான குவாண்டம் கொள்கை

பொதுவாகப் பெரோ காந்தப் பொருட்களுக்குக் கொள்கை மற்றும் சோதனை முடிவுகளில் ஒரு முரண்பாடு கியூரி வெப்பநிலைக்குக் கீழ்க் காணப்படுகின்றது. இதற்கு ஒரு காரணமாக கியூரி-வெயிஸ் விதி, கியூரிவெப்பநிலைக்கருகாமையில் முறிந்து போய் விடுகின்றது என்பதைச் சுட்டிக் காட்டலாம்.

மூலக்கூறு காந்தத் திருப்புத்திறன் வெயிஸ் கொள்கையில் ஒரு மாறிலியாகக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. ஆனால் சோதனை முடிவுகள், ஒரே அமைப்பிலுள்ள மூலக்கூறுகளில் மூலக்கூறுக்கு மூலக்கூறு, அவற்றின் குவாண்டம் நிலைக்கு ஏற்ப அது வேறுபடலாம் என்று தெரிவிக்கின்றன. குவாண்டம் கொள்கையில் இது கணக்கில் எடுத்துக்கொள்ளப்பட்டுள்ளது.

வெயிஸ் கொள்கையில் மூலக்கூறு புலத்தின் இயல்தன்மை பற்றி ஏதும் குறிப்பிட்டுச் சொல்லப்படவில்லை. காந்தத்திருப்புத்திறன் உடைய மூலக்கூறுகளுக்கிடையேயான காந்த இடையீட்டுச் செயல்கள் காரணமாக இது தோன்றியிருக்க முடியாது என்று உறுதியாகச் சொல்லமுடியும். ஐஹசன்பெர்க் என்பார், குவாண்டம் கொள்கையின் உதவியோடு, இம்மூலக்கூறுபுலம், மின்மூலமுடையதாக இருக்கின்றது என்றும் இது ஓர் எலக்ட்ரானின் பரிமாற்ற வினையின் பலனால் ஏற்படுகின்றது என்றும் நிறுவினார்.

மூலக்கூறு காந்த அச்சு புறகாந்தப்புலத்திசைக்கு எத்திசையை

நோக்கியும் அமைந்திராமல், குவாண்டம் கொள்கையின்படி சில குறிப்பிட்ட கோணங்களில் மட்டுமே இருக்க முடியும்.

ஒரு பொருளின் பாரா காந்தத் தன்மை, குவாண்டம் கொள்கைப்படி (சமன்பாடு 3.47 லிருந்து)

$$I / I_s = B_J (x), \quad (3.57)$$

இதில் $x = aJ = g_J J \mu_B B / k_B T$

$B_J(x)$ என்பது பிரிலோயின் சார்பாகும்.

பெரோகாந்தப் பொருளுக்கும், பாராகாந்தப் பொருளுக்கும் உள்ள ஒரு வேறுபாடு மூலக்கூறு புலமாகும். எனவே Bஐ $B_{செயலுறு}$ என்பதால் செய்தால்

$$x = g_J J \mu_B (B + \lambda I) / k_B T$$

தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கு $B = o$, $x = g_J J \mu_B \lambda I / k_B T$

அல்லது $I = k_B T x / g_J J \mu_B \lambda$

இதன் தெவிட்டு மதிப்பு $I_s = N_{gJ} J \mu B$. எனவே

$$I / Is = k_B T x / N \lambda g_J^2 J^2 \mu_B^2 \quad (3.58)$$

இவ்விரு சமன்பாடுகளுக்கும் இணக்கமான தீர்வுகள், தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனையைத் தருகின்றது. இதன் வரைபடம் (3.23)ல் காட்டப்பட்டது போலவே இருக்கும்.

வெயிஸ் கோட்டின் சரிவு $RT/I_s^2\lambda$ ஆக இருக்கும். இக்கோடு வரைபடத்தில் தொடக்கத்திலிருந்து பிரிலோயின் கோட்டிற்கு வரையப்பட்ட தொடுகோட்டுடன் பொருந்தினாலும் அல்லது அதற்கும் கூடுதலான சரிவுடன் இருந்தாலும் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் ஏற்படுவதில்லை. எந்த வெப்பநிலையில் இருகோடுகளின் சரிவும் ஒன்றாக இருக்கின்றதோ, அவ்வெப்பநிலை கியூரி வெப்பநிலை எனப்படும். $T>\theta$ என்ற நிலையில் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கல் இருப்பதற்கான வாய்ப்பு சிறிதும் இல்லை. $T<\theta$ எனில் இது இயலுவதாகின்றது. x-ன் குறைவான மதிப்புடையதாக இருப்பின்

$B_J(x) = (J+1 / 3J)\, x$

எனவே தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனையை

$$(J + 1 / 3J) > k_B\theta / N\lambda g_J^2 \mu_B^2 J^2 \qquad (3.59)$$

இதிலிருந்து கியூரி வெப்பநிலையைக் கணக்கிடலாம்.

$$\theta = N\lambda g_J^2 \mu_B^2 J (J+1) / 3k_B \qquad (3.60)$$

$$3R\theta/_\lambda = N^2 g^2{}_J \mu_B^2 J (J + 1) = (NM_{\text{அணு}})^2 = I_s^2$$

வெயிஸ் கொள்கையில் பெற்ற அதே சமன்பாடு (3.54) குவாண்டம் கொள்கையால் தோராய மதிப்பாகின்றது.

முன்பு செய்ததுபோல, வெப்பநிலை சார்ந்த காந்தமாக்கத்தைப் பற்றியும் விரிவாக அறிந்து கொள்ள முடியும்

$$I / I_s = BJ (x) \qquad (3.61)$$

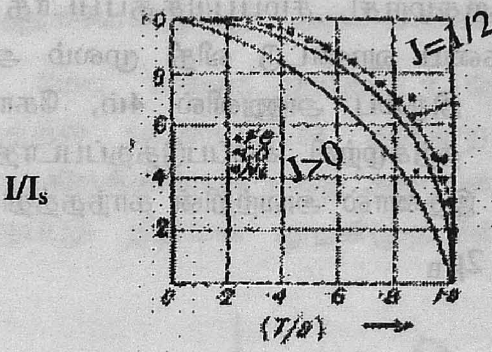
இதில் $I = k_B Tx / g_J J \mu_B \lambda$ என்றும் $I_s = N_g JJ\, B$ என்றும் அறிவோம். எனவே

$$I/ I_s = k_B.T\, x / N g_J^2 J^2 \mu_B^2 \lambda$$

இதில λ -ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$I/ I_s = (J + 1/3J)\, (T / \theta)\, x \qquad (3.62)$$

I/I_s ன் மதிப்பு (3.61) மற்றும் (3.62) சமன்பாடுகளுக்குஏற்ப இருக்க வேண்டும் என்பதால் வரைபடத்தில் அவற்றின் வெட்டுப் புள்ளிகளால் அனுமதிக்கப்படுவதை I/Is-ன் மதிப்புகளைத் தருகின்றன. வெவ்வேறு T/θ -ன் மதிப்பிற்கு I/Is-ன் மதிப்பைக் கண்டு, வரைபடம் வரையலாம். படம் 3.26ல் $J = \theta\ J = 1, J = ½$ எனக் கொண்டு மூன்று



சோதனை மதிப்புகள்

படம் 3.26 I/I_s - T/θ வரைபடம் (வெவ்வேறு J மதிப்புகளுக்கு)

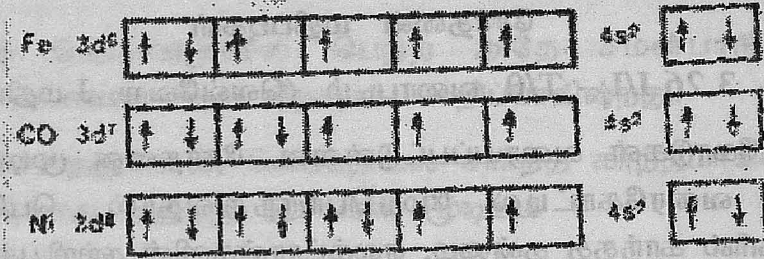
வரைகோடுகள் வரையப்பட்டுள்ளன. சோதனை முடிவுகள் J=1/2 என்ற வரைகோட்டில் மேற்பொருந்துவதால், பெரோகாந்தப் பொருட்களில் காந்தத் தன்மை, எலக்ட்ரான்களின் சுற்றியக்கத்தைவிட அவற்றின் தற்சுழற்சியால் ஏற்படுகின்றது என்பதை ஐயத்திற்கிடமின்றிப் புலப்படுத்திக் காட்டுவதாக இருக்கின்றது.

3.17 பெரோகாந்த மூலங்கள்

பொருட்களின் பெரோகாந்தத் தன்மைக்கு அதிலுள்ள அணு எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சியே பெரும்பங்கு ஏற்கின்றது என்று நிருபிக்கப்பட்டாலும், அணுவிலுள்ள எவ்வெலக்ட்ரான்கள் இதற்குக் காரணமாக இருக்கின்றன என்று திட்டவட்டமாகக் கூறவில்லை. இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் அணுக்களில் $1s^2$, $2s^2$ $2p^6$, $3_s{}^2 3_p 6$ என்றவாறு எலக்ட்ரான் அமைவுள்ள ஆர்கான் அணுவின் உள்ளகத்தை நாம் கவனத்திற் கொள்ள வேண்டியதில்லை. 4s என்ற கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் மின் கடத்துத்திறனுக்கும், படிகப் பிணைப்பிற்கும் காரணமாக இருக்கின்றன என்பதை அறிவோம். எனவே பெரோ காந்தத்தன்மைக்குக் காரணமாக இருக்கக்கூடிய ஒரே மூலம், தற்சுழற்சி சமப்படுத்தப்படாத 3d எலக்ட்ரான்கள் மட்டுமே.

கண்டறியப்பட்ட மற்றும் கணக்கிடப்பட்ட காந்தமாக்கல் தெவிட்டு மதிப்புகளை இப்போது ஒப்பிடுவோம். 3d கூட்டில் தற்சுழற்சி சமப்படுத்தப்படாத தனி எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் கொண்டு கொள்கை வாயிலான மதிப்பைப் பெறமுடியும். தற்சுழற்சி சமப்படுத்தப்படாத தனி எலக்ட்ரான்கள் ஒவ்வொன்றும், ஒரு போர்

மாக்னெட்டான் அளவு காந்தத்திருப்புத் திறனை நல்கும். Fe, Co, Ni அணுக்களில் உள்ள தற்சுழற்சி சமப்படுத்தப்படாத தனி எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையை ஹண்ட்டு விதி மூலம் அறிந்து கொள்ள முடியும். இதன்படி இரும்பு அணுவில் 4ம், கோபால்ட் அணுவில் 3ம், நிக்கலில் 2ம் தற்சுழற்சி சமப்படுத்தப்படாத தனி எலக்ட்ரான்கள் இருக்கின்றன. இதனால் அவற்றின் காந்தத்திருப்புத் திறன்கள் முறையே $4\mu_B, 3\mu_B, 2\mu_B$

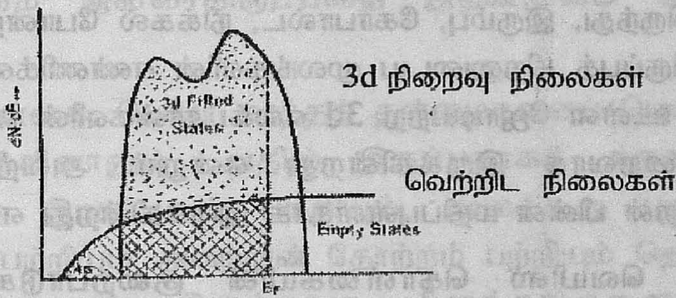


படம் 3.27 பெரோ காந்த அணுக்களில் தற்சுழற்சி சமப்படாத தனி எலக்ட்ரான்கள்

என்றிருக்க வேண்டும். T=oK வெப்பநிலையில் தெவிட்டிய காந்தமாக்கம் மற்றும் ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை இவற்றைக் கொண்டு Fe, Co, Ni க்குப் பெறப்பட்ட மதிப்புகள் முறையே 2.27μB, 1.72μB, 0.54μB ஆகும். எண் மதிப்புகளில் ஏற்றத்தாழ்வு இருப்பதுடன், அவை முழு எண் மதிப்பாக இல்லாமல் பின்ன மதிப்புள்ளதாக இருப்பதையும் இவ்வொப்பீடு தெரிவிக்கின்றது. எனவே ஓர் அணுவிலுள்ள காந்தமூலத்தின் செயலுறு காந்தத்திருப்புத்திறன், அதில் முழு எண் எண்ணிக்கையில் எலக்ட்ரான்கள் இருந்தாலும், பின்ன மதிப்புடையது என்று அனுமானிக்க வேண்டியிருக்கின்றது. ஆனால் இந்த முரண்பாடுகள், புதிர்கள் என்று கருதவேண்டியதில்லை. ஏனெனில் நாம் கற்பித்த விளக்கங்கள் யாவும், தனித்த அணுக்களை மட்டுமே கருத்திற்கொண்டு பெறப்பட்டுள்ளன. திண்மப் பொருட்களில் கட்டுண்ட எலக்ட்ரான்களின் நிலை, உண்மையில் தனித்த அணுவிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் நிலையிலிருந்து பெரிதும் வேறுபட்டது. எனவே

ஒருவர் உலோகங்களின் ஆற்றல் பட்டைக் கொள்கைகளை அணுகவேண்டியது அவசியமாகின்றது.

மோட் மற்றும் ஸ்லேட்டர் போன்ற விஞ்ஞானிகள் குறுகிய 3d ஆற்றல் பட்டையுடன் அகன்ற 4s ஆற்றல்பட்டை குறுக்கிட்டு கலந்திருக்கின்றது என்ற அடிப்படையில் பின்ன மதிப்புடைய காந்தத் திருப்புத் திறனை முதன்முதலில் விளக்கினார்கள்.



படம் 3.28 நிக்கலில் குறுகிய 3d பட்டையும் அகன்ற 4எ பட்டையும் குறுக்கிட்டுக் கலந்திருத்தல்

3d மற்றும் 4s எலக்ட்ரான்களில் சராசரியாக ஒரு பகுதி ஒவ்வொரு பட்டையிலும் நிலை பெற்றிருக்கக் கூடிய வாய்ப்பைப் பெற்றிருக்கின்றது. இவ்விரு பட்டைகளிலும் எலக்ட்ரான்களின் சார்புச் செறிவு உண்மையில் பெர்மி ஆற்றலால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. எடுத்துக்காட்டாக நிக்கலில் மொத்தம் 10, 3d மற்றும் 4s எலக்ட்ரான்கள் உள்ளன. இதில் சராசரியாக 9.4 எலக்ட்ரான்கள் 3d பட்டையிலும் 0.6 எலக்ட்ரான் 4s பட்டையிலுமாக பகிர்வு பெற்றுள்ளன. ஹுண்ட்டு விதிப்படி இதில் 5 எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சி இணையாகவும், 4.4 எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சி எதிரிணையாகவும் இருக்கும் எனக் கூறலாம். எனவே தொகுபயன் 0.6 எலக்ட்ரான்களின் இணைத் தற்சுழற்சி சமப்படுத்தப்படாதது என்றும், அதன் காந்தத் திருப்புத்திறன் 0.6 μ_B என்றும் கூறலாம். இது நிக்கலின் சோதனை மதிப்பான 0.54μB உடன் ஒன்றியிருக்கின்றது.

இவ்விளக்கத்தின் உண்மைத் தன்மையை, நிக்கலுடன் துத்தநாகம் அல்லது செம்பு இவற்றைக் கலந்து பெறப்பட்ட கலப்பு உலோகங்களைக் கொண்டு சோதித்துப் பார்க்கலாம். ஒரு நிக்கல் அணுவிற்குப் பதிலாக ஒரு செம்பு அணுவை உட்புகுத்தும்போது

படிகத்தில் ஓர் எலக்ட்ரான் கூடுதலாகச் சேருகின்றது. இது துத்தநாகமெனில் கூடுதல் எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை 2 ஆகி விடுகின்றது. இக்கூடுதல் எலக்ட்ரான்கள் 3d கூட்டை நிறைவு செய்வதால், ஓர் அணு, பொருளின் காந்தத் திருப்புத் திறனுக்கு அளிக்கும் சராசரி பங்களிப்பு குறைந்து போகின்றது. இதன் பலனாக 60% செம்பு, அல்லது 30% துத்தநாகத்தை நிக்கலுடன் கலந்தால் கலப்பு உலோகத்தின் காந்தமாக்கச் செறிவு சுழியாகிவிடுகின்றது.

இதிலிருந்து, இரும்பு, கோபால்ட், நிக்கல் போன்ற அணுக்களில் காந்தத் திருப்புத் திறனுடைய மூலங்களின் எண்ணிக்கை, உறுதியாக அவற்றில் உள்ள ஜோடியற்ற 3d எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையை விடக் குறைவாக இருக்கின்றது என்றும் அவற்றின் காந்தத் திருப்புத்திறன் பின்ன மதிப்புள்ளதாக இருக்கின்றது என்றும் கூறலாம்.

வெயிஸ் கொள்கையின் குறைபாடுகள்

1. வெயிஸ் மாறிலி ஒரு மாறிலியாகக் கொள்ளப்பட்டிருந்தாலும் அது சோதனை மூலம் மெய்ப்பிக்கப்படவில்லை.

2. வெயிஸ் மாறிலியின் மதிப்பு 10^4 நெடுக்கையில் உள்ளது. இதன் நெடுக்கை இருமுனை-இருமுனை (dipole-dipole) இடையீட்டுச் செயலின் அடிப்படையில் எதிர்பார்க்கப்படுகின்ற மதிப்பான லாரன்ஸ் காரணீய உறுப்பு (Lorentz factor) $4\pi/3$-யை விடப் பெருமளவு அதிகமாக இருக்கின்றது. அதாவது மூலக்கூறுபுலம் சாதாரணமாகக் காந்தங்களால் ஏற்படும் காந்தப்புலத்தைப் போல் சில ஆயிரம் மடங்கு உள்ளது. இதற்கான காரணம் விவரிக்கப்படவில்லை. வெயிஸ் உண்மையில் அகக்காந்தப்புலத்தின் இயற்பியல் தன்மையைப் பற்றி ஏதும் குறிப்பிட்டுச் சொல்லவில்லை.

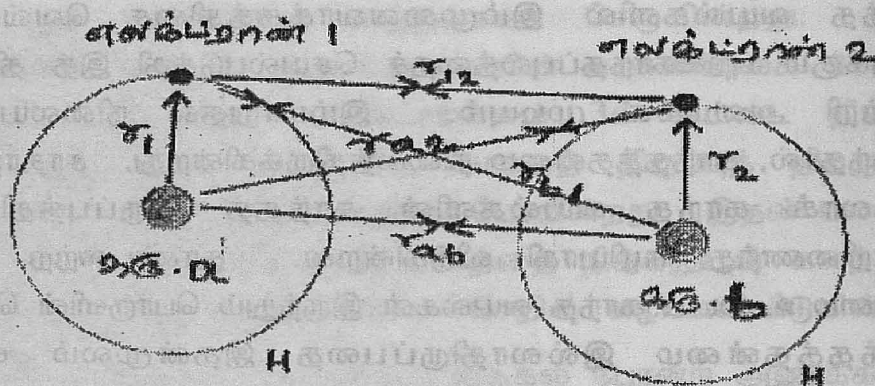
3. பெரோ காந்தப் பொருள் சாதாரண வெப்பநிலைகளில் தூண்டலற்ற காந்தத் தன்மையைப் பெற்றிருக்கின்றது. இந்த வெப்பநிலைகளில் பொருளின் காந்தத் தன்மையை அகற்றிவிடவும் முடியும். இதற்கான விளக்கத்தை வெயிஸ் கொள்கை ஓரளவு தருகின்றது. பெரோகாந்தப் பொருள் காந்தவயல்களாக வகுக்கப்பட்டு, ஒவ்வொரு காந்த வயலிலும் உள்ள மூலக்கூறுகளின் காந்த அச்சுகள் இணையாக்கப்பட்டு, ஒரு குறிப்பிட்ட திசைநோக்கி அமைந்திருக்கும். வெவ்வேறு

காந்த வயல்களில் இம்முனைவாக்கத்திசை வெவ்வேறாக இருக்கும் புறக்காந்தப்புலத்தைச் செயல்படுத்தி இத் திசையை மாற்றி அமைக்க முடியும். இம்மாறுதல் நிலையானதாக இருந்தால், காந்தத்தன்மை நிலைத்திருக்கின்றது. சாதாரணமாக எல்லாக் காந்த வயல்களின் காந்தத் திருப்புத்திறன்கள் ஒன்றிணைந்து சுழியாகி விடுகின்றன. தூண்டலற்ற காந்தத் தன்மை உடைய காந்த வயல்கள் இருந்தும் பொருளின் மொத்தக் காந்தத்தன்மை இல்லாதிருப்பதை இதன்மூலம் விளக்க முடிகின்றது.

வெயிஸ் கொள்கை, பெரோ காந்தத் தன்மைகளைப் பொதுவான முறையில் விளக்கினாலும், அதில் இருப்பதாகக் கருதப்படும் காந்தவயல்களின் இயல்புகள் பற்றியும், மூலக்கூறு புலத்தின் தனித்தன்மைகள் பற்றியும் அவற்றின் தோற்றம் பற்றியும் தெளிவாக வரையறுக்கவில்லை. இதற்கான விளக்கங்களைத் தர தொல்லியற்பியலாலும், பழங்குவாண்டம் கொள்கையாலும் இயலவில்லை. ஹைசன்பெர்க் என்பார் இதற்குரிய விளக்கத்தை அலையியக்கக் கொள்கையின் அடிப்படையில் பெற்றார்.

3.18 ஹெசன்பெர்க் பெரோகாந்தக் கொள்கை

வெயிஸ் புலத்தின் வலிமையை விளக்குவதற்கு ஹைசன்பெர்க் என்பார், ஹைட்ரஜன் மூலக்கூறுகளுக்குக் கற்பித்த ஹெய்ட்லர்-லண்டன் (Heitler & London) கொள்கையை ஹைட்ரஜன் அயனிக்கு விரிவுபடுத்தினார். இரு ஹைட்ரஜன் அணுக்களில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் ஒன்றுக்கொன்று ஏற்படுத்திக் கொள்ளும் பரிமாற்றுக் குறுக்கீட்டு விளைவினால் (exchange effect) வெயிஸ் புலம் தோன்றுகின்றது என்று முடிவு செய்தார். பரிமாற்றுக் குறுக்கீட்டு விளைவு ஒரு பரிமாற்ற விளைவைத் தூண்டி, காந்த அயனிகளுக்கிடையே ஒரு வலுவான பிணைப்பை ஏற்படுத்துகின்றது. இது அடிப்படையில் காந்தவிசையாலான இடையீட்டுச் செயலாக



படம் 3.29 ஹைட்ரஜன் மூலக்கூறும் நிகழும் இடையீட்டுச் செயல்களும்

இல்லை என்றும் அவர் கருதினார். அதாவது அடிப்படையில் பரிமாற்ற விசை, கூலூம் வினையால் தூண்டப்பட்டு, அதன் வலிமை காந்த வினையால் விளைவதைக் காட்டிலும் அதிகமாக இருக்குமாறு அமைகின்றது. பரிமாற்ற விசை பொதுவாகத் தற்சுழற்சி எலக்ட்ரான்களால் ஏற்படும் வினையால் தோன்றுகின்றது. ஏனெனில் குவாண்டம் ஆற்றல் நிலைகளில் எலக்ட்ரான்களின் பகிர்வு பௌலியின் தவிர்க்கை விதியால் வரம்பிற்கு உட்பட்டிருக்கின்றது.

வினையின் வலிமை, வினையாற்றும் அயனிகளுக்கிடைப்பட்ட தொலைவைப் பொறுத்திருக்கின்றது. அதன் நேரெண் மதிப்பு, இடைத்தொலைவு மாற்றத்தினால் எதிரெண் மதிப்பாகவும் கூட மாறுகின்றது. இரு அணுக்களும் ஒன்றுக்கொன்று நெருக்கமாக வரும்போது, ஒவ்வொரு அணுவிலும் இருக்கும் ஜோடியற்ற எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சி இணையாக இருக்கும் என்றும், இடைத்தொலைவு மேலும் குறையக் குறையப் பரிமாற்ற விசை குறைந்து இறுதியில் சுழியையும் கடந்து, எதிரிணையான தற்சுழற்சிக்கு அனுகூலமாக விளங்கும் என்றும் இக்கொள்கை அனுமானிக்கின்றது.

ஹைட்ரஜன் மூலக்கூறில் இரு புரோட்டான்களும் (கரு a மற்றும் கரு b) இரு எலக்ட்ரான்களும் (எலக்ட்ரான் 1 மற்றும் 2) உள்ளன. எலக்ட்ரான் 1> a என்ற புரோட்டானோடும், எலக்ட்ரான் 2, b என்ற புரோட்டானோடும் இணைந்துள்ளன. ஒத்த சுழலில் இவற்றின் இயக்கம் இருப்பதால் ஒன்றின் இயக்கம் மற்றொன்றின் இயக்கத்தில்

தாக்கத்தை ஏற்படுத்தாது என்று ஊகம் செய்யலாம்.

இவ்வமைப்பின் இயக்கத்திற்கான ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு

$$\nabla_1^2\psi + \nabla_2^2\,\psi + 2m/h^2\,[E - V(r_1) - V(r_2)]\,\psi = o$$

எலக்ட்ரான் 1, k என்ற நிலையிலும், எலக்ட்ரான்-2, m என்ற நிலையிலும் இருந்தால், தனித்த எலக்ட்ரானுக்கான அலையியக்கத் தீர்வை Ψk, Ψm என்று குறிப்பிடலாம். இவ்வியக்கச் சார்புகள் உண்மையானவை, ஒன்றையொன்று சாராதவை, இயல்தன்மை ஊட்டப்பட்டவை. இதன்படி நாம் எடுத்துக்கொண்ட அமைப்பு இரு நிலைகளிலும் இருக்கமுடியும். அவற்றின் அலைச்சார்பும், ஆற்றலும்,

$$\psi_I = \psi_k(r_1)\,\psi_m(r_2)\;;\; E = E_k + E_m$$

$$\psi_{II} = \psi_k(r_2)\,\psi(r_1)\;;\; E = E_k + E_m$$

இதில் ΨII, அணு எலக்ட்ரான்கள் இடம்மாறியதால் ஏற்பட்ட அமைப்பு நிலையைக் குறிக்கின்றது. ΨI மற்றும் ΨII ஆகிய இரு தீர்வுகளும் இயலக்கூடிய நிலைகளைக் குறிப்பதாக இருப்பதால், அவற்றின் நேரடிக் கலப்புகளை, ஏற்றுக் கொள்ளத்தக்க தீர்வாகக் கருதலாம். இது குவாண்டம் கொள்கையில் மெய்ப்பிக்கப்பட்டுள்ளது. கலப்புகளில் நேர்சீர்மைத் தீர்வு (symmetric) என்றும் எதிர்சீர்மைத் தீர்வு (anti symmetric) என்றும் இருவகை உள்ளன. அவற்றை

$$\psi_{\text{நேர்சீர்மை}} = 1/\sqrt{2}\,[\psi_I + \psi_{II}]$$

$$\psi_{\text{எதிர்சீர்மை}} = 1/\sqrt{2}\,[\psi_I - \psi_{II}]$$

இப்போது அமைப்பிலுள்ள இரு எலக்ட்ரான்களும் இடையீட்டுச் செயலால் பெறும் கூடுதல் நிலையாற்றலையும் கருத்திற் கொள்வோம். உண்மையில் எல்லாவகையான கூலும் வினைகளையும் கருதினால்

$$V_{ab} = V(r_1) + V(r_2)$$

எனவே

$$V_{ab} = e^2/4\pi\epsilon o\,[1/r_{ab} + 1/r_{12} - 1/ra_1 - 1/rb_2 - 1/ra_2 - 1/rb_1]$$

இதற்கான ஷ்ரோடிஞ்சர் சமன்பாடு

$$\nabla^2\psi + 2m/h^2 [E - V_{ab}] \psi = o$$

இதன் தீர்வுகள் தனி எலக்ட்ரான் தீர்வுகளின் பெருக்கல் பலனாகக் கொள்ளலாம்.

$$\psi_I = \psi_k(1)\ \psi_m(2)$$

இத்தனி எலக்ட்ரான் தீர்வுகளை

$$H_1\ \psi_k(1) = E_1\ \psi_k\ (1)$$

$$H_2\ \psi_m(2) = E_2\ \psi_m(2)$$

என்ற அலையியக்கச் சமன்பாடுகளைத் தீர்வு செய்து பெறலாம். மேலும் அமைப்பின் மொத்த ஆற்றல்

$$E = E_1 + E_2$$

H_1, H_2 என்பன ஹாமில்டன் சார்புகளாகும். எலக்ட்ரான்கள் இடமாறுவதால் ஹாமில்டன் சார்பு மாறுவதில்லை என்பதால்

$$\psi_{II} = \psi_k(2)\ \ \psi_m(1)$$

என்ற தீர்வும் வாய்ப்புள்ளதாக இருக்கவேண்டும். இந்நிலையில் நேர்சீர்மை மற்றும் எதிர்சீர்மை கொண்ட தீர்வுகளை

$$\psi_{\text{நேர்சீர்மை}} = 1/\sqrt{2}\ [\psi_I + \psi_{II}] = 1/\sqrt{2}\ [\psi_k(1)\ \psi_m(2) + \psi_k(2)\ \psi_m(1)]$$

$$\psi_{\text{எதிர்சீர்மை}} = 1/\sqrt{2}\ [\psi_I - \psi_{II}] = 1/\sqrt{2}\ [\psi_k(1)\ \psi_m(2) - \psi_k(2)\ \psi_m(1)]$$

எலக்ட்ரான்களின் இடமாற்றத்தால் $\psi_{\text{நேர்சீர்மை}}$-ல் மாற்றம் ஏற்படுவதில்லை. இது இரு எலக்ட்ரான்களும் ஒத்த செறிவூட்டவெளியில் இருக்கின்றன என்பதைக் குறிப்பிடுவதால், பௌலியின் தவிர்க்கை விதிக்கு ஒரு முரண்பாடாகின்றது. ஆனால் எலக்ட்ரான்களின் இடமாற்றத்தால் ψஎதிர்சீர்மையின் குறி நேர்எதிராக மாறிவிடுகின்றது. இது பௌலியின் தவிர்க்கை விதிக்கு முரண்பாடானதாக இல்லை என்பதால் எல்லா அலைச்சார்புகளும் எலக்ட்ரான்களின் இடமாற்றத்தைப் பொருத்தமட்டில் எதிர்சமச் சீர்மை உடையதாக விளங்கவேண்டும் என்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.

வேதிப் பிணைப்பு பற்றிய ஹெய்ட்லர்-லண்டன் கொள்கையின்படி, இந்த அமைப்பின் மொத்த ஆற்றலை $E=K=J_e$ என்று குறிப்பிடலாம். இதில் K என்பது கூலூம் இடைவினை காரணமாக விளையும் ஆற்றலாகும். J_e என்பது பரிமாற்றக் குறுக்கீட்டு விளை வினைகளின் தொகுப்பாக்கம் எனப்படும். இது அணுக்கரு a ல் உள்ள எலக்ட்ரான் 1, அணுக்கரு b ல் உள்ள எலக்ட்ரான்-2 உடன் இடமாற்றம் செய்து கொள்வதற்கான வாய்ப்பைக் குறிப்பிடுகின்றது.

$$J_e = \int \psi_a^*(1)\, \psi_b^*(2)\, V_{ab}\, \psi_a(2)\, \psi_b(1)\, \delta\tau_1\, \delta\tau_2$$

பரிமாற்றக் குறுக்கீட்டு வினை விளைவு எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சியைப் பற்றி இருக்கின்றது. அவற்றின் தற்சுழற்சிகள் எதிரிணையாக இருந்தால் (↑↓) அது காந்தமற்ற நிலை (Non-magnetic state) என்றும், இணையாக இருந்தால் (↑↑) காந்தநிலை (magnetic state) என்றும் அழைக்கப்படும். காந்தமற்ற நிலையின் ஆற்றல் $K+J_e$ ஆகவும், காந்தநிலையின் ஆற்றல் $K-J_e$ ஆகவும் இருக்கும். காந்தமற்ற நிலையில் எதிரிணைத் தற்சுழற்சி காரணமாக இரு அணுக்களும் கவரப்படுகின்றன. காந்தநிலையில் இணைத் தற்சுழற்சி காரணமாக விலக்கப்படுகின்றன. காந்தநிலை

$$K - J_e < K + J_e$$

என்ற நிபந்தனைக்கு உட்பட்டிருந்தால் நிலைப்புத்தன்மைமிக்கதாக விளங்குகின்றது. அதாவது J_e நேர்குறி மதிப்புடையதாக இருக்க வேண்டும்.

நம்முடைய விளக்கங்களுக்கு கூலூம் இடைவினை ஆற்றல் தேவையில்லை என்பதால் பரிமாற்றக் குறுக்கீட்டு விளைவினை ஆற்றலை மட்டும் கருத்திற் கொள்வோம்.

$$V_e = -2J_e\, S_1\, S_2$$

அடிப்படையில் பரிமாற்றக் குறுக்கீட்டு விளைவினை நிலை மின்தன்மையது. Si, Sj என்ற மொத்த தற்சுழற்சி கொண்ட a,b என்ற இரு அணுக்களுக்கிடையேயான இடையீட்டுச் செயலால் விளையும் ஆற்றல்

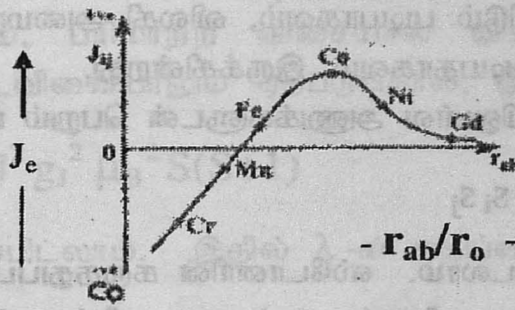
$$V_e = -2J_{ij}\, S_i\, S_j \qquad (3.63)$$

பெத்தே என்பார் அணுவிடைத் தொலைவு r_{ab},3d எலக்ட்ரான்களின் சுற்றுப்பாதை ஆரம் r_0, -யை விடப் பெரிதும் அதிகமாக இருந்தால் J_{ij} நேர்குறியுடையதாக இருக்கின்றது என்று தெரிவித்தார். $J_{ij}>0$ எனில், அமைப்பானது தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலையில் அமைந்து ↑↑ என்ற காந்தநிலையை நிலைப்படுத்தும். இதுவே பெரோகாந்தத் தன்மையைப் பெறுவதற்கான அடிப்படை நிபந்தனையாகும். $J_{ij}<0$ எனில் இது பெரோ காந்தத் தன்மைக்கு அடிப்படைக் காரணமாகின்றது. ஸ்லேட்டர் என்பார் r_{ab}/r_0-ன் மதிப்பு ஏறக்குறைய 3 ஆக இருக்கின்றது எனக் கண்டறிந்தார்.

அட்டவணை 3.3

சில தனிமங்களும் அவற்றின் r_{ab}/r_o-ன் மதிப்பும்

தனிமம்	r_{ab}/r_o
Fe	3.26
Co	3.64
Ni	3.94
Cr	2.60
Mn	2.94
Gd	3.10



படம் 3.30 பரிமாற்றுத் தொகுப்பாக்கத்திற்கும் rab,/r0-க்கும் உள்ள தொடர்பு

அட்டவணை 3.3லிருந்து Mnக்கும் Crக்கும் $r_{ab}/r_0<3$ என்றிருப்பதால் அவை பெரோ காந்தத் தன்மையற்றவைகளாக இருக்கும் என்றும் பிற தனிமங்களுக்கு $r_{ab}/r_0>3$ என்பதால், அவை பெரோகாந்தத் தன்மை கொண்டிருக்கும் என்பதைத் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

சோதனை முடிவுகள் கொள்கை வாயிலாக நாம் பெற்ற முடிவிற்குப் பெரிதும் ஆதரவாக இருக்கின்றன. மாங்கனீஸ் படிகத்தளத்தில் நைட்ரஜனைச் சிறிதளவு சேர்க்கும்போது r_{ab} அதிகரிப்பதால், படிகத்தளப் பண்பளவு (parameter) மாறுபடுகின்றது. அதனால் நைட்ரஜன் ஊட்டப்பட்ட மாங்கனீஸ் பெரோகாந்தமாகி விடுகின்றது. ஒரு தனிமத்தை வேறொரு பெரோ காந்தமல்லாத தனிமத்துடன் சேர்த்து தயாரிக்கப்படும் கூட்டுப்பொருளின் r_{ab}/r_0 மதிப்பு 3க்கு சற்று அதிகமாக இருக்குமானால் அப்பொருளைப் பெரோ காந்தமாக்க முடியும் என்பதை இவ்வாய்வு புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றது. Mn-Cu-Al கலப்பு உலோகமும் (ஹியூஸ்லர் (Heusler) கலப்பு உலோகம் எனப்படுகின்றது) MnSb, MnBi போன்ற சேர்மங்களும் பெரோ காந்தத்தன்மையை வெளிப்படுத்துகின்றன. இது கொள்கைக்குக் கிடைத்த ஒரு வெற்றியாகும்.

J_eக்கும் λ விற்கும் உள்ள தொடர்பு

பரிமாற்றத் தொகுப்பாக்கம் J_e வெயிஸ் மாறிலி λ மற்றும் கியூரி வெப்பநிலை θ இவைகளுக்கிடையேயான ஒரு தொடர்பை ஸ்டோனர் (Stoner) என்பார் வருவித்தார்.

மிக அருகருகே அமைந்துள்ள இரு அணுக்களுக்கிடையே J_e ன் மதிப்பு குறிப்பிடும் படியாகவும், விலகி அமைந்துள்ள நிலையில் புறக்கணிக்கக் கூடியதாகவும் இருக்கின்றது. i என்ற கருதப்பட்ட அணு அருகாமையிலுள்ள அணுக்களுடன் பெறும் பரிமாற்ற ஆற்றலை

$$V_e = -2J_e \Sigma_j s_i s_j \quad (3.64)$$

எனக் குறிப்பிடலாம். ஸ்டோனரின் கருத்துப்படி, ஒரு குறிப்பிட்ட நேரத்தில் அருகாமையிலுள்ள ஓர் அணுவின் தற்சுழற்சியை அதன் காலச்சராசரியாக எடுத்துக்கொள்ளலாம். எனவே

$$V_e = -2J_eZ\,(S_{xi} <s_{xj}> + S_{yi} <S_{yj}> + S_{zi} <S_{zj}>) \quad (3.65)$$

ஓவ்வொரு அணுவிற்கும் சராசரியாக z அருகாமை அணுக்கள் இருப்பதாகக் கொள்ளப்பட்டு இது பெறப்பட்டுள்ளது.

காந்தமாக்கம் z- ஆய அச்சுத் திசையோடு ஒன்றியிருப்பதாகக் கொண்டால், ஒரு மோலார் செறிவுள்ள பொருளுக்கு

$$<S_{xj}> = <S_{yj}> = O$$

$$<S_{zj}> = I / g\mu_B N$$

எனவே

$$V_e = -2J_eZ\,S_{zi}\,I / g\mu_B N \quad (3.66)$$

இது λ I என்ற வெயிஸ் புலத்தில் i என்ற மொத்தத் தற்சுழற்சியுடைய அணுவின் நிலையாற்றலாகும். அதாவது

$$V_e = -g\,S_{zi}\mu_B\,\lambda I \quad (3.67)$$

இவ்விரு தொடர்புகளும் ஒரே ஆற்றலைக் குறிப்பிடுவதால்

$$\lambda = 2ZJ_e / Ng^2\mu_B^{\,2} \quad (3.68)$$

முன்பு வருவித்த சமன்பாடு (3.60)-ன்படி

$$3R\theta/\lambda = N^2 g_J^{\,2} \mu_B^{\,2} J(J+1)$$

பொருட்களில் பெரோகாந்தத் தன்மை எலக்ட்ரான்களின் தற்சுழற்சியாலும், பரிமாற்ற விசையால் விளையும் தற்சுழற்சி தற்சுழற்சி இடைவினையாலும் ஏற்படுவதால், இதை

$$3R\theta/\lambda = N^2 g_J^2 \mu_B^2 S(S+1)$$

என்று குறிப்பிடலாம். இதில் λ-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

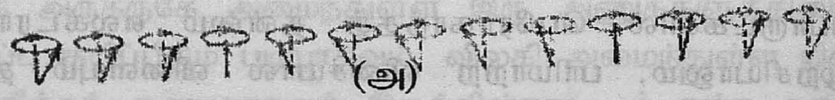
$$\theta = 2Z J_e S(S+1) / 3k_B \qquad (3.69)$$

z=6 என்றும் S=1/2 என்றும் கொண்டால் $J_e/k_B\theta = 0.333$. ஆனால் மேன்மையூட்டப்பட்ட தோராயம் இதற்கு ஓரளவு வேறுபட்ட மதிப்புகளைத் தருகின்றது. எளிய கனச்சதுரம், உடல்மைய கனச்சதுரம், முகமைய கனச்சதுரம் போன்ற கட்டமைப்புடன் கூடிய பொருட்களுக்கு z=6 என்றும் S=1/2 என்றும் கொண்டு முறையே

$$J_e/k_B\theta = 0.6, 0.51, 0.48$$

3.19 பெரோகாந்தத் தற்சுழற்சி ஊடலைகள் (Ferromagnetic spin waves)

பெரோ காந்தப் பொருட்களில் சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் காந்தமாக்கம் தெவிட்டு நிலையில் இருக்கின்றது. சுழியற்ற பிற வெப்பநிலைகளில் காந்தமாக்கச் செறிவு குறைவாக இருக்கின்றது. இக்குறைவிற்குத் தனித்த அணுக்களின் தற்சுழற்சிகள் தலைகீழாக மாறுவதாலோ, அல்லது பிற அணுக்களின் தற்சுழற்சி மாறாத நிலையோடு ஓர் அணுவின் தற்சுழற்சியை மட்டும் கொண்டோ விளக்கம் கொடுக்க முடியாது. இதற்காக, தற்சுழற்சி தலைகீழ் மாற்றத்திற்குக் காரணமான ஆற்றலை அமைப்பிலுள்ள எல்லாத் தற்சுழற்சிகளும் பங்கிட்டுக் கொள்கின்றன என்று கருதுகின்றார்கள். இதற்குப் பரிமாற்ற குறுக்கீட்டு விளைவினை அனுகூலமாயிருக்கின்றது. எனவே சமகாலத்தில் எல்லா அணுக்களின் தற்சுழற்சிகளையும், புலத்திசை பற்றிய அவற்றின் சுழற்சி இயக்கங்களையும் (precession) கருத்திற் கொள்ளவேண்டியது அவசியமாகின்றது.





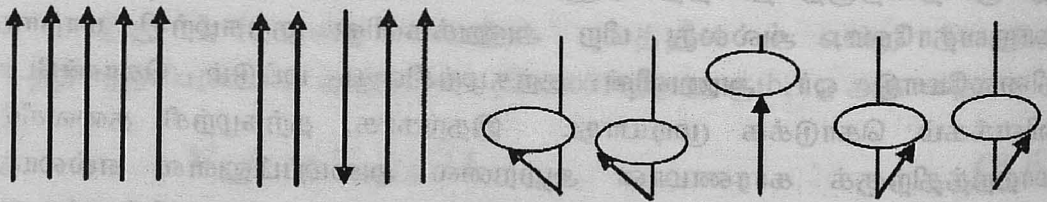
(ஆ)

படம் 3.31 ஒரு நேர்கோட்டமைப்பில் தற்சுழற்சி ஊடலை

(அ) புலத்திசையில் தற்சுழற்சியின் சுழற்சி இயக்க நிலை

(ஆ) ஒரு நேர்கோட்டு அணுக்களின் தற்சுழற்சியின் சார்பு நிலைகள்

பெரோ காந்தப் பொருளிலுள்ள அனைத்து அணுக்களின் தற்சுழற்சிகளும் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையில் இணையாக இருக்கின்றன என்பது தொல்லியற்பியல் தந்த முடிவாகும். படம். 3.32 (அ) ஓரணு கிளர்ச்சியுறும்போது அதன் தற்சுழற்சி தலைகீழாக மாற்றம் பெறுகின்றது. படம் 3.32 (ஆ) இதனால் ஊடகத்தில் ஓர் ஊடலை விளைகின்றது. படம் (3.32 இ) கிளர்ச்சி நிலையின் தொடக்க நிலைகளைக் குறிப்பிடுகின்றது. இதைத் தற்சுழற்சி ஊடலை என்பர். ஒரு கூம்பின் சாய்வுப்பரப்பில் தற்சுழற்சி வெக்டார் சுற்றிவர, ஒரே நேர்கோட்டில் அமைந்த தற்சுழற்சிகள் ஒரு குறிப்பிட்ட நிலைக்கட்டக் கோணத்தில் தொடர்ந்து சீராக மாறிவருகின்றன.



(அ) (ஆ) (இ)

படம் 3.32 பெரோகாந்தப் பொருளில் தற்சுழற்சி ஊடலைத் தோற்றம்

மாக்னான்

(Magnon)

படம் 3.31, 3.32ல் காட்டியுள்ளபடி, ஒரு தற்சுழற்சியின் கிளர்ச்சி ஆற்றல் அதனோடு மட்டும் தொடர்புடையதாக நிலைத்திருப்பதில்லை. அடுத்தடுத்த தற்சுழற்சிகளுக்கிடையேயான பரிமாற்று கிளர்ச்சி இடைவினை மூலம், அமைப்பிலுள்ள எல்லாத் தற்சுழற்சிகளும் பங்கிட்டுக் கொள்கின்றன. அதாவது கிளர்ச்சியானது, அமைப்பில் ஓர் அலை ஊடுருவுவது போல ஊடுருவிச் செல்கின்றது. இதையே தற்சுழற்சி ஊடலை என்பர். மின்காந்த அலைகள், படிகத்தளத்தில் அதிர்வலைகள் போல தற்சுழற்சி ஊடலை எடுத்துச் செல்லும் ஆற்றலும் குவாண்டம் அளவில் இருக்கின்றது. அதாவது அதன் ஆற்றல் எல்லா மதிப்புகளிலும் இருப்பதில்லை. தற்சுழற்சி ஊடலை ஆற்றலின் குவாண்டம் அளவை மாக்னான் என்பர். இது படிகத்தள அதிர்வும், அதோடு தொடர்புடைய குவாண்டம் அளவு ஆற்றலான போனான் (phonon) துகளையும் ஒத்தது எனலாம். இதிலிருந்து தற்சுழற்சி ஊடலை என்பது, ஒரு படிகத் தளத்திலுள்ள தற்சுழற்சிகளின் சார்புத் திசையமைவுகளின் அலைவுத் தோற்றத்தைக் குறிக்கும் எனலாம்.

மாக்னான் பிரிகைக்கான ஒரு தொடர்பு

(Magnon dispersion relation)

இது தற்சுழற்சி ஊடலையின் அதிர்வெண்ணிற்கும், படிகத்தள மாறிலிக்கும் உள்ள தொடர்பாகும்.

ஊடகத்தில் p என்ற புள்ளியில் S_p என்ற தற்சுழற்சி இருப்பதாகவும், இது அருகாமையிலுள்ள S_{p-1}, S_{p+1} என்ற தற்சுழற்சிகளோடு பரிமாற்ற வினையில் ஈடுபட்டிருப்பதாகவும் கருதுவோம். பரிமாற்ற இடைவினை ஆற்றலை

$$V_e = -2J_e S_P \ (S_{P-1} + S_{P+1})$$

p என்ற புள்ளியில் S_p தற்சுழற்சி விளைவிக்கும் காந்தத்திருப்புத்திறன்

$$M_p = -gs_p M_p$$

எனவே பரிமாற்ற இடைவினை ஆற்றல்

$$V_e = 2J_e/g_{\mu B}.\ M_p\ (S_{p-1} + S_{p+1}) \quad (3.70)$$

இது காந்தப்புலத்தில் நிலையாற்றலுக்கான தொடர்பு $-M_pB_p$ என்பதைப்போல இருக்கின்றது. இதில் B_p என்பது பயன்முனைப்பான காந்தப்புலம் அல்லது பரிமாற்ற இடைவினைப்புலம் (exchange field) எனப்படும். இவ்விரு தொடர்புகளையும் ஒப்பிட்டு

$$B_p = -\ 2J_e/g\mu_B\ (S_{p-1} + S_{p+1}) \quad (3.71)$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம்.

இயக்கவியலின்படி கோணஉந்தம் $\hbar S_p$ -ன் மாறுபாட்டுவீதம், திருப்புவிசை (torque) $M_p \times B_p$ க்குச் சமமாக இருக்கவேண்டும். இது S_p -ன் மீது செயல்படுகின்றது. எனவே

$$\hbar\ ds_p/dt = M_p \times B_p$$

அல்லது

$$ds_p/dt = -\ g\mu_B/\hbar\ (S_p \times B_p)$$

$$= 2J_e/\hbar\ (S_p \times S_{p-1} + S_p \times S_{p-1})$$

கார்ட்டீசியன் ஆயக்கூறுகளின் அடிப்படையில்

$$ds_{p\,(x)}/dt = 2J_e/\hbar\ [\ S_{p(y)}\ (S_{p-1(z)} + S_{p+1(z)})$$

$$-\ S_{pz}\ (S_{p-1(y)} + S_{p+1\,(y)})] \quad (3.72)$$

இதுபோல பிற ஆயக் கூறுகளுக்கும் குறிப்பிட முடியும். இச்சமன்பாடுகளில் தற்சுழற்சி ஆக்கக்கூறுகளின் பெருக்கல்கள் வருவதால், அவை நேர்கோட்டுச் சார்பற்றவைகளாக இருக்கும் எனலாம். கிளர்ச்சியின் அலைவீச்சு மிக நுண்ணிய அளவினதாக இருந்தால், அதாவது $S_{p(x)}S_{p(y)} << S_{p(z)}$ எனில், மேற்கண்ட சமன்பாடுகளைத் தோராயமாக நேர்கோட்டுச் சார்புள்ளவைகளாக மாற்றிக் கொள்ள முடியும்.

$$S_{p(z)} = S_{p-1(z)} = S_{p+1(z)} = S \qquad (3.73)$$

என்று அனுமதித்துக்கொண்டால்

$$ds_{p(x)}/dt = 2J_e s/h\,[2s_{p(y)} - s_{p-1(y)} - s_{p+1(y)}]$$

$$ds_{p(y)}/dt = 2J_e s/h\,[2s_{p(x)} - s_{p-1(x)} - s_{p+1(x)}] \qquad (3.74)$$

$$ds_{p(z)}/dt = 0$$

போனான் கொள்கையில் முன்னேறு அலைகளின் தீர்வைப் பெறும் வழிமுறையை ஒப்பிட்டு,

$$\left.\begin{aligned} S_{p(x)} &= u_{\exp}\,[i\,(pka - \omega t] \\ S_{p(y)} &= v_{\exp}\,[i\,(pka - \omega t] \end{aligned}\right\} \qquad (3.75)$$

என்ற தொடர்புகளைப் பெறலாம். இதில் u,v இரண்டும் அலைவீச்சு மாறிலிகளாகும். p என்பது ஒரு முழு எண் மதிப்புள்ளதாகவும், a என்பது படிகத்தளத்தின் மாறிலியாகவும் உள்ளன. இத்தீர்வுகளை மேற்குறிப்பிட்ட சமன்பாடுகளில் பதிலீடு செய்தால்

$$-i\omega u = 2J_e S/h\,[2 - e^{ika} - e^{ika}]\,v$$

$$= 4J_e S/h\,(1 - \text{Cos } ka)\,v \qquad (3.76)$$

$$-i\omega v = -2J_e S/h\,(2 - e^{-ika} - e^{+ika})\,u$$

$$= -4J_e S/h\,(1 - \text{Cos } ka)\,u \qquad (3.77)$$

சமன்பாடுகள் (3.76) மற்றும் (3.77) தீர்வு பெற்றிருக்க அதன் குணகங்களாலான அணிக்கோவை (determinant) சுழியாக இருக்கவேண்டும்.

$$\begin{vmatrix} i\omega & 4J_eS/h\,(1-\text{Cos}\,ka) \\ -4J_eS/h\,(1-\text{Cos}\,ka) & i\omega \end{vmatrix} = 0$$

இது

$$h\omega = 4J_eS\,(1-\text{Cos}\,ka) \qquad (3.78)$$

என்ற தொடர்பைத் தருகின்றது. இது ஒற்றைப் பரிமாண வெளியில் அருகாமையிலுள்ள தற்சுழற்சிகளுடன் மேற்கொள்ளும் இடையீட்டுச் செயலால் விளையும் தற்சுழற்சி ஊடலையின் அலைப்பிரிகைக்கான தொடர்பாகும். அலைநீளம் அதிகமாயிருந்தால்

$ka << 1$

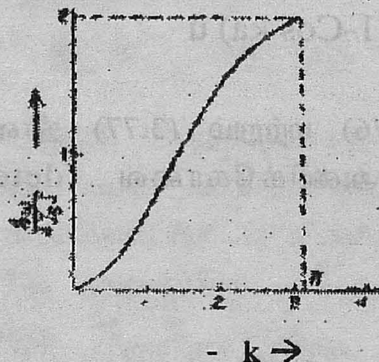
எனவே

$(1-\text{Cos}\,ka) = \frac{1}{2}\,(ka)^2$

இந்நிலையில்

$$h\omega = 2J_eS\,a^2\,k^2 \qquad (3.79)$$

இத்தொடர்பானது தற்சுழற்சி ஊடலையின் அதிர்வெண் k^2க்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது. (போனானுக்கு அதிர்வெண் kக்கு நேர்விகிதத்தில் உள்ளது)



- k →

படம் 3.33 ஒற்றைப் பரிமாணவெளியில் மாக்னானின் பிரிகைக்கான வரைகோடு

$(1\text{-}coska) = \frac{1}{2} (ka)^2$ என்ற தொடர்பை ஒரு வரைபடத்தால் சுட்டிக்காட்ட முடியும்.

இச்சமன்பாட்டை (3.77)ல் பதிலீடு செய்தால்

$v = -iu$

என்ற நிபந்தனையைப் பெறலாம். இதை Sp(x) மற்றும் Sp(y)ல் பதிலீடு செய்ய

$$\left.\begin{aligned} S_p(x) &= u \operatorname{Cos} (pka - \omega t) \\ S_p(y) &= u \operatorname{Sin} (pka - \omega t) \end{aligned}\right\} \qquad (3.80)$$

எனப்பெறலாம். இவற்றை இருமடியாக்கிக் கூட்ட

$$Sp^2(x) + Sp^2(y) = u^2 \qquad (3.81)$$

இத்தொடர்பு, வட்டச் சுழற்சி இயக்கத்தைச் சுட்டிக்காட்டுகின்றது.

தற்சுழற்சி ஊடலைகளின் குவாண்டப் பண்பு (Quantisation of spin waves)

அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையில் பெரோகாந்தப் பொருளில் தற்சுழற்சி ஊடலைகள் கிளர்ச்சியுற்ற நிலைகளின் பிரதிபலிப்பாக இல்லை. அதனால் எல்லாத் தற்சுழற்சிகளும் ஒரு திசைநோக்கி இணையாக அமைந்திருக்கின்றன. ஒரு தற்சுழற்சியின் கோணஉந்தம் ஞ எனில், அமைப்பில் N தற்சுழற்சிகள் இருந்தால் மொத்த தற்சுழற்சி கோண உந்தம் NS ஆகும். தற்சுழற்சி ஊடலைகளின் கிளர்ச்சியினால், ஒரு திசை நோக்கி இணையாக அமைந்திருந்த தற்சுழற்சிகள் அப்படியே நீடித்திருப்பதில்லை. அதனால் மொத்த தற்சுழற்சி கோணஉந்தம் குறைவுறுகின்றது.

முதலில் தற்சுழற்சி ஊடலையின் அலைவீச்சிற்கும், ஞு-அச்சு ஆக்கக்கூறில் தற்சுழற்சி கோணஉந்தத்தின் குறைபாட்டிற்கும் உள்ள ஒரு தொடர்பைப்பெற்று, பின்னர், தற்சுழற்சி ஊடலைக் கிளர்ச்சியுறுவதால் பெறும் ஆற்றலுக்கான தொடர்பைப் பெறுவோம். Sx, Sy, Sz முறையே மொத்த தற்சுழற்சியின் அச்சு ஆக்கக் கூறுகளெனில்

$$Sx^2 + Sy^2 + Sz^2 = S^2$$

சமன்பாடு (3.81)ன் படி

$$u^2 + S_z^2 = S^2$$

அல்லது

$$S_z = (S^2 - u^2)^{1/2} = S - u^2/2S$$

மிகச் சிறிய அளவிலான அலைவீச்சு என்பதால் அதனால் இத்தோராயம் அனுமதிக்கப்பட்டது. இதிலிருந்து

$$NS - NS_z = Nu^2/2s \tag{3.82}$$

என்ற தொடர்பைப் பெறலாம். குவாண்டம் கொள்கை $(S - S_z)$ -ன் மதிப்புகள் குவாண்டம் மதிப்புடையவைகளாக இருக்கவேண்டும் என்று தெரிவிக்கின்றது. எனவே $N(S - S_z)$-ன் மதிப்பு குவாண்டம் அளவுகளில் மாறுபடவேண்டும் என்று முடிவு செய்யலாம். இதை n_k என்று குறிப்பிடுவோம். எனவே

$n_k = NU_k^2/2s$ அல்லது $U_k^2 = 2Sn_h/N$ (3.83)

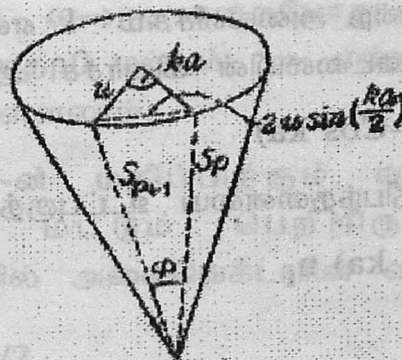
இது தற்சுழற்சி ஊடலை அலைவீச்சின் குவாண்டப் பண்பைத் தெரிவிக்கின்றது. n_k என்பது ஒரு முழு எண். இது கிளர்ச்சியுற்ற அலை வெக்டார் k-உடன் தொடர்புடைய மாக்னான்களின் எண்ணிக்கையைக் குறிக்கின்றது.

ஒவ்வொரு மாக்னானும் மொத்த தற்சுழற்சியின் Z-அச்சு ஆக்கக்கூறை ஓரலகு குறைக்கின்றது.

கிளர்ச்சியுற்ற ஊடலையின் ஆற்றல்

k என்ற தற்சுழற்சி ஊடலைக் கிளர்ச்சி பெறும்போது E_k என்ற அதன் ஆற்றலை மதிப்பிட, S_p, S_{P+1} என்ற தற்சுழற்சிகள் மேற்கொள்ளும் இடைவினையைக் கருதுவோம். இடைவினை ஆற்றல்,

$$V_e = -2J_e \, Sp. \, S_{p+1} \tag{3.84}$$



படம் 3.34 தற்சுழற்சி வெக்டார்களின் நிலைக்கட்டக் கோணம் க்கும் தற்சுழற்சி ஊடலையின் அலைவீச்சு ருக்கும் உள்ள தொடர்பு

சுழற்சி இயக்கத்தின் போது S_p, S_{p+1} இடைப்பட்ட கோணம் ϕ எனில்

$$V_e = -2J_e S^2 \cos\phi \tag{3.85}$$

S என்பது தற்சுழற்சி வெக்டாரின் எண்ணளவு ஆகும். படம் 3.34லிருந்து

$$2u \sin(ka/2) = 2S \sin(\phi/2)$$

எனவே

$$\sin(\phi/2) = u/s \sin(ka/2)$$

$$\cos\phi = 1-2\sin^2\phi/2 = 1-2(u^2/s^2)\sin^2(ka/2)$$

$$= 1-2(u/s)^2[1-\cos ka/2]$$

Cos ϕ-ன் இம்மதிப்பைப் பதிலீடு செய்தால்

$$V_e = -2J_e S^2[1-(u/s)^2(1-\cos ka)] \tag{3.86}$$

தற்சுழற்சி அமைப்பில் N தற்சுழற்சிகள் இருக்குமெனில் மொத்த இடைவினை ஆற்றல்

$$V_e = -2J_e NS^2[1-(u/s)^2(1-\cos ka)]$$

$$= -2J_e NS^2 + 2J_e Nu^2(1-\cos ka) \tag{3.87}$$

இதிலிருந்து U_k என்ற அலைவீச்சும் k என்ற அலைவெக்டாரும் உடைய தற்சுழற்சி ஊடலையின் கிளர்ச்சி ஆற்றல்

$$E_k = 2Je\ Nu_k^2\ (1\text{-}Cos\ ka)$$

குவாண்டமாக்க நிபந்தனையை உட்புகுத்தினால்

$$E_k = 4J_e\ S(1\text{-}Cos\ ka)\ n_k$$

$$= n_k h_k \qquad (3.88)$$

இதிலிருந்து மாக்னான் ஆற்றலின் குவாண்டப் பண்பை அறிந்து கொள்ள முடிகின்றது.

மாக்னானின் வெப்பக் கிளர்ச்சிகள்

(Thermal Excitation of Magnon)

வெப்பநிலை உயர்வால் ஒரு வளிமத்தில் உள்ள துகள்கள் கிளர்வுற்றுத் தன்னியக்கத்தை அதிகரித்துக் கொள்வதைப் போல வெப்பநிலை உயர்வால் மாக்னான்களும் கிளர்ச்சி பெறுகின்றன. நாம் முன்பு குறிப்பிட்டதைப்போல மாக்னான் ஒவ்வொன்றும் மொத்தத் தற்சுழற்சியின் z-அச்சு ஆக்கக்கூறை ஓரலகு குறைக்கின்றது. இக்குவாண்டம் அலகிலான குறைப்பு காந்தமாக்கலிலும் விளைகின்றது. அதாவது காந்தமாக்கத்திற்குப் பங்களிப்புச் செய்யும் தற்சுழற்சி ஓரலகு குறைகின்றது.

T என்ற வெப்பநிலையில் உள்ள அமைப்பில் கிளர்ச்சியுற்ற எல்லா நிலைகளிலும் இருக்கின்ற அனைத்து மாக்னான்களையும் $\sum_k n_k$ கணக்கிடுவோம்.

$$\Sigma n_k = \int Z(\omega) \langle n_k \rangle d\omega$$

இதில் $Z(\omega)$ என்பது ஓரலகு அதிர்வெண் நெடுக்கையில் உள்ள அல்லது மற்றும் $\omega + d\omega$ என்ற வரம்பிற்குட்பட்ட k என்ற குவாண்டம் நிலைகளின் எண்ணிக்கையாகும். $\langle n_k \rangle$ என்பது இந்நிலையில் உள்ள மாக்னான்களின் சராசரி எண்ணிக்கையாகும். இங்கு மேற்கொள்ளப்படும் தொகுப்பாக்கம் அனுமதிக்கப்படுகின்ற k-ன் மதிப்புகளின் நெடுக்கையில் செய்யப்பட்டுள்ளது. இது உண்மையில் முதல் பிரிலோயின் மண்டலமாகும். மிகவும் தாழ்ந்த

வெப்பநிலைகளில் $\omega \rightarrow \infty$ என்றபோது $<n_k> \rightarrow 0$ என்பதால், இத்தொகுப்பாக்கத்தை 0 மற்றும் ∞ என்ற வரம்பு மதிப்புகளுக்கு உட்பட்டு மேற்கொள்ளலாம்.

ஒவ்வொரு k-ன் மதிப்பிற்கும் மாக்னான்கள் ஒற்றை தளவாக்கத்தை மட்டும் பெற்றிருக்கின்றன. ஓரலகு முப்பரிமாணவெளியில் அலைவெக்டாரின் வகை எண்ணிக்கை

$$(1/2\pi)^3 \ 4\pi k^2/3$$

எனவே ω மற்றும் $\omega + d\omega$ என்ற கோண அதிர்வெண் நெடுக்கையில் உள்ள மாக்னான்களின் எண்ணிக்கை

$$Z(\omega)\, d\omega = (1/2\pi)^3\, (4\pi\, k^2)\, (dk/d\omega)\, d\omega \qquad (3.89)$$

சமன்பாடு (3.79) லிருந்து

$$\hbar\omega = 2J_e Sa^2\, k^2$$

$$d\omega/dk = (4\, J_e Sa^2 / \hbar)\, k$$

k-ன் இம்மதிப்பை பதிலீடு செய்ய

$$d\omega/dk = 2\, (2J_e\, Sa^2 / \hbar)^{1/2}\ \ \omega^{1/2}$$

இம்மதிப்பை (3.89)ல் பதிலீடு செய்ய

$$Z(\omega) = 1/4\pi^2\, (\hbar/2J_e Sa^2)\, \omega^{1/2} \qquad (3.90)$$

வெப்பச்சமநிலையில் n_k-ன் சராசரி மதிப்பு, பிளாங் பங்கீட்டுத் தனத் தொடர்பால் வரையறுக்கப்படுகின்றது.

$$<n_k> = 1/[e^{h\varepsilon}/k_B T - 1]$$

இம்மதிப்புகளைக் கொண்டு $\sum n_k$-ன் மதிப்பைக் கண்டறியலாம்.

$$\sum n_k = 1/4\pi^2\, (\hbar/2J_e sa^2)^{3/2} \int_0^\infty \omega^{1/2}\, d\omega\, / e^{\hbar\omega/k_B T} - 1$$

புதிய மாறியின் அடிப்படையில; $x=\hbar\omega/k_BT$

$$\Sigma n_k = 1/4\pi^2 (k_BT/2J_esa^2)^{3/2} \int_0^\infty x^{1/2}\, dx/(e^x-1)$$

படித்தரத் தொகுப்பாக்கத்தின்படி

$$\Sigma n_k = 0.0587\,(k_BT/2J_eSa^2)^{3/2} \qquad (3.91)$$

இது படிகத்தின் ஓரலகுப் பருமனில் கிளர்ச்சியுற்ற மாக்னான்களின் எண்ணிக்கையைக் குறிப்பிடுகின்றது.

3.20 T என்ற வெப்பநிலையில் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் அல்லது ப்ளாக் $T^{3/2}$ விதி (Bloch $T^{3/2}$ law)

ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கை Q/a^3 என்போம். இதில் எளிய கனச்சதுரம், ஆகியவைகளுக்கு Q-ன் மதிப்பு முறையே 1,2,4 ஆகும். இது படிகத்தில் மூலஅலகு (unit cell) ஒன்றில் இருக்கக்கூடிய அணுக்களின் எண்ணிக்கையாகும்.

காந்தத்திருப்புத்திறனின் தெவிட்டிய மதிப்பு

$M = nS$

சுழிக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில் தற்சுழற்சி ஊடலைகள் கிளர்வுற்று மாக்னான்கள் மூலம் காந்தத் திருப்புத் திறனைக் குறைக்கின்றது. இக்குறைவு மொத்த மாக்னான்களின் எண்ணிக்கையைப் பொறுத்தது. எனவே

$$\Delta M = M_s - M = \Sigma_k n_k = 0.0587 \quad (k_BT / 2J_eSa^2)^{3/2}$$

காந்தத் திருப்புத் திறனில் ஏற்படும் இக்குறைவிற்கும், தெவிட்டிய காந்தத் திருப்புத் திறனின் மதிப்பிற்கும் உள்ள தகவு பின்னக் குறைவு (fractional decrease) என்பர்.

$$\Delta M/Ms = 0.0587 / ns\,(k_BT / 2J_e\, s\, a^{2)3/2} \qquad (3.92)$$

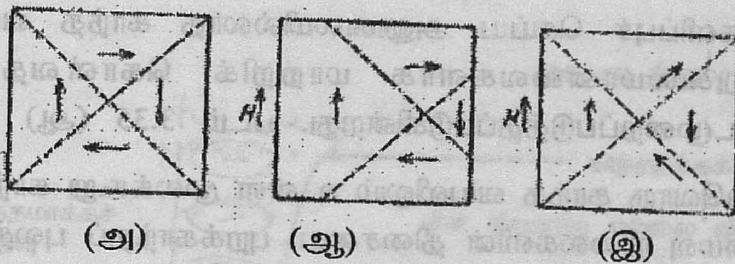
இதை பிளாக் $T^{3/2}$ விதி என்பர். இது தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் சரியாகப் பொருந்தி வருகின்றது. உயர்வெப்பநிலைகளில்,

மாக்னான்களின் செறிவு மிகவும் அதிகரித்து விடுகின்றது. அந்நிலையிலே தற்சுழற்சி ஊடலை மாதிரியமைப்பு முறிந்து ஒவ்வாததாகிவிடுகின்றது.

3.21. பெரோ காந்த வயல்கள் (Ferromagnetic domains)

பெரோ காந்தப் பொருட்களின் காந்தப் பண்பை விளக்க வெயிஸ் என்பார் காந்த வயல்களை நிறுவினார். இதனால் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கத்தையும், ஒரே வெப்பநிலையில் இருக்கக்கூடிய காந்தநிலை மற்றும் காந்தமற்றநிலை இரண்டையும் விளக்குவதற்கு இது அனுகூலமாக அமைந்தது. காந்தமாக்கத் திசை, காந்தவயல்களுக்கு வயல் மாறுபட்டதாக இருப்பதால், பொருளின் காந்தமாக்கச் செறிவைச் சுழியிலிருந்து தெவிட்டிய பெருமம் வரை இருக்குமாறு செய்து கொள்ள முடிகின்றது.

வெயிஸின் “காந்த வயல்“ என்ற கருத்து பின்வரும் பெரோகாந்தப் பண்புகளை விளக்கக்கூடியதாக இருக்கின்றது.



படம்.3.35. காந்த வயல்களும் காந்தமாக்கப்படுதலும்

1) ஒரு காந்தத் துண்டை இரு துண்டாக்கினால், அவை ஒவ்வொன்றும் காந்தத் தன்மையைப் பெற்றிருக்கின்றன. இதற்குக் காரணம் காந்த வயல்கள் இரு துண்டுப் பகுதிகளிலும் விரிந்திருப்பதுதான்.

2) ஒரு காந்தத்தை வெப்பப்படுத்தினாலும், பலத்த அதிர்வுகளுக்கு உள்ளாக்கினாலும், அது தன் காந்தத் தன்மையை இழந்து விடுகின்றது. காந்த வயல்களில் மூலக்கூறு காந்தங்களின் அமைவுநிலைகளில் நிலைக்குலைவு ஏற்படுவதால் இது விளைகின்றது

3) மென்னிரும்பில் (soft Iron) உள்ள காந்தப் வயல்களை மிகவும்

குறைந்த அளவு காந்தப்புலத்தினால் எளிதாக அவற்றில் உள்ள மூலக்கூறு காந்தங்களைத் திருப்பி அமைக்கமுடிகின்றது. அதனால் மென்னிரும்பை எளிதாகக் காந்தமாக்கம் செய்யவும், காந்தநீக்கம் செய்யவும் முடிகின்றது. எ.்.குப் பொருட்களுக்கு, காந்த வயல்களைத் திருத்தி அமைக்க உயரளவு காந்தப்புலம் தேவையாய் இருக்கின்றது. இது எ.்.குப் பொருட்கள் காந்தத்தன்மையை தக்கவைத்துக் கொள்ளும் தன்மையை (retentivity) விளக்கக் கூடியதாக இருக்கின்றது.

4) ஒரு காந்தப் பொருளைத் திடீரெனக் காந்தமாக்கம் செய்யும்போது, அதனுடைய நீளத்தில் சிறிதளவு மாற்றம் ஏற்படுகின்றது. இதற்குக் காரணம் அதனுள் உள்ள காந்தவயல்கள் சீரமைக்கப்படுகின்றன என்பதாகும். பல்வேறு திசைகளில் அமைவு நிலைகளைப் பெற்றுள்ள காந்தவயல்களை இருவேறு வழிமுறைகள் மூலம் சீரமைக்க முடியும்.

i) காந்த வயல்களின் வரப்புகளை நகர்த்துவதின் மூலம் செய்யலாம். பொருளின் காந்தத் திருப்புத் திறனுக்குப் பங்களிப்புச் செய்ய அனுகூலமில்லாத காந்த வயல்களை, அனுகூலமானவைகளாக மாற்றிக் கொள்வதால் இது நடைமுறைப்படுத்தப்படுகின்றது. படம் 3.35 (ஆ)

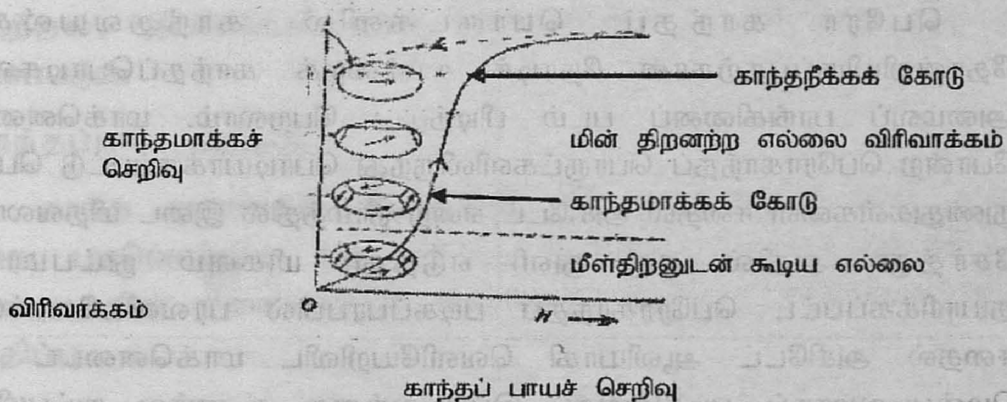
ii) ஒவ்வொரு காந்த வயலிலும் உள்ள மூலக்கூறு காந்தங்களின் அமைவு நிலைகளின் திசையை, புறக்காந்தப் புலத்திசையை நோக்கிப் படிப்படியாகத் திருப்பி அமைத்துக் கொள்வதினாலும் இதை நடைமுறைப்படுத்த இயலும். படம் 3.35 (இ)

செறிவற்ற காந்தப்புலத்தில் காந்த வயல்களின் எல்லை விரிவாக்கமும், (முதலாவது வழிமுறை) செறிவுள்ள காந்தப்புலத்தில் காந்த வயல்களின் சுழற்சித் திருப்பமும் (இரண்டாவது வழிமுறை) ஏற்பட வாய்ப்புகள் அதிகமாயிருக்கின்றன என்பதைச் சோதனை முடிவுகள் தெரியப்படுத்தியிருக்கின்றன.

இக்கருத்துகளை ஒரு பெரோ காந்தப் பொருளுக்கான தயக்கக் கண்ணி (hysteresis) வரைபடத்தைக் கொண்டு தெளிவுபடுத்திக் கொள்ள முடியும்.

ஒரு புறக்காந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்தும்போது, அத்திசையில்

அமைவு நிலைகளைக் கொண்டுள்ள காந்தவயல்கள் வளர்ச்சி பெறுகின்றன. பிற காந்த வயல்கள் அதற்கேற்ப மறைகின்றன. அதாவது அனுகூலமான காந்த வயல்களின் எல்லைகள் விரிவடைகின்றன எனலாம். இது பொருளின் காந்தத்திருப்புத் திறனுக்குச் சிறிதளவே பங்களிப்புச் செய்கின்றது. இது தயக்கக் கண்ணியின் தொடக்க நிலையால் குறிப்பிடப்படுகின்றது. காந்த வயல்களின் வரப்புகளை நகர்த்துதல் செறிவற்ற புலத்தில் மீள்திறனுடையதாக இருக்கின்றது. புலச்செறிவை அதிகரிக்கும்போது, அதிக எண்ணிக்கையில் காந்த வயல்கள், பொருளின் காந்தத்திருப்பு திறனுக்குக் கூடுதலான அளவில் பங்களிப்புச் செய்கின்றன. அதனால் காந்தமாக்கச் செறிவு விரைவாக அதிகரிக்கின்றது. எல்லையின் விரிவாக்கம் அதிக அளவில் ஏற்பட்டிருப்பதால், இம்மாற்றத்தை அகற்றுவதென்பது காந்தப்புலத்தைக் குறைப்பதால் மீட்டுப் பெற்றுவிடமுடியாது. அதனால் இது மீள்திறனற்ற மாற்றம் எனப்படும். இது அனுகூலமான காந்தவயல்கள் ஒரு பெருமப் பரிமாணத்தை எட்டும்வரை தொடர்கின்றது. இது தயக்கக்கண்ணியின் நிமிர்வான கோட்டப்பகுதியில் காட்டப்பட்டிருக்கின்றது.



படம் 3.36 தயக்கக்கண்ணி வரைபடம்

காந்த வயல்களில் மூலக்கூறு காந்தங்கள் எல்லாம் புறக்காந்தப் புலத்திற்குச் சாய்வாக ஒரு குறிப்பிட்ட திசையில் இருப்பின் காந்தமாக்கத்தைச் கூடுதல் தடையின்றி எளிதாகச் செய்ய முடிகின்றது. வெவ்வேறு காந்தவயல்களில் மூலக்கூறு காந்தங்களின் முனைவாக்கத் திசையும், புறக்காந்தப்புலத் திசையும் ஒன்றாக

இல்லாமலும் இருக்கலாம். எனவே புறக்காந்தப் புலத்தின் செறிவை மேலும் அதிகரிக்கும்போது, இந்த மூலக்கூறு காந்தங்களின் அச்சுகள் சுழன்று காந்தப்புலத்திற்கு இணையாக்கப்படுகின்றன. ஒரு நிலையில் தெவிட்டு நிலையை அடைகின்றது. அந்நிலையில் பொருளில் உள்ள எல்லா மூலக்கூறு காந்தங்களும் புலத்திசையில் அமைந்திருக்கும். அதன் பிறகு காந்தப்புலச்செறிவை அதிகரிப்பதால், காந்தமாக்கச் செறிவை அதிகரிக்க முடியாது.

இதன்பிறகு காந்தப்புலச் செறிவைக் குறைக்கும்போது, காந்த நீக்கக் கோடு, காந்தமாக்கக் கோட்டைப் பின்பற்றுவதில்லை. ஏனெனில் பெரிதும் ஒரு முனைப்படுத்துப்பட்ட காந்த வயல்கள், மிக எளிதாகத் தங்களுடைய தொடக்க அமைவு நிலைகளைப் பெற்றுவிடுவதில்லை. காந்தப்புலச் செறிவைச் சுழியாக்கிவிட்டாலும், பொருள் தான் ஏற்கனவே பெற்ற காந்தத்தன்மையை முற்றும் இழந்து விடாமல் இருப்பதற்கு இதுவே காரணமாகின்றது. காந்தமாக்கச் செறிவை சுழியாக்குவதற்கு H_c என்ற காந்தப்புலச்செறிவை எதிர்திசையில் செயல்படுத்த வேண்டியதாக இருக்கின்றது.

காந்தவயல்களின் கட்டமைப்பிற்கான சோதனைச் சான்றுகள்

பெரோ காந்தப் பொருட்களில் காந்தவயல்கள் தோன்றியிருப்பதற்கான நேரடிச் சான்றைக் காந்தப்பொடிகளின் அமைவுப் பாங்கினைப் படம் பிடித்துப் பெறலாம். மாக்னெடைட் போன்ற பெரோகாந்தப் பொருட்களிலிருந்து பொடியாக்கப்பட்டு பெற்ற நுண்துகள்களை ஈதைல் அசிடேட் என்ற நீர்மத்தில் இடை மிதவலாகச் சேர்த்து, அதில் ஒரு துளி எடுத்து, மிகவும் நுட்பமாகத் தயாரிக்கப்பட்ட பெரோகாந்தப் படிகப்பரப்பில் பரவவிடவேண்டும். ஈதைல் அசிடேட் ஆவியாகி வெளியேறிவிட மாக்னெடைட் ஒரு மென்படலமாகப் படிகின்றது. இப்படலத்தை உணர்வு நுட்பமிக்க ஒரு நுண்ணோக்கி மூலமாகப் பார்த்தால், மாக்னெடைட் துகள்கள், அணி அணியாகப் படிந்திருப்பதைப் பார்க்கமுடிகின்றது. ஒரு சில குறிப்பிட்ட கோடுகளில் துகள்கள் மிகவும் செறிவுற்றிருக்கின்றன. இக்கோடு காந்த வயல்களின் வரப்பாகும். இப்பாங்கை ஒளிப்படம் எடுக்கவும் முடியும். இவ்வழிமுறை பிட்டர் (Bitter) என்பாரால் நிறுவப்பட்டது.

மற்றொரு வழிமுறையை பௌலர் (Fowler) மற்றும் ப்ரையர்

(Fryer) போன்றவர்கள் இணைந்து நிறுவினார்கள். காந்த வயல்கள் தளவாக்கம் செய்யப்பட்ட ஒளியால் துலக்கப்பட்டு, எதிரொளிப்பு ஒளியைப் பகுப்பாய்வான் (analyser) மூலம் பார்ப்பது இம்முறையாகும். காந்த - ஒளியியல் (magneto-optical) விளைவு காரணமாக, தளவாக்கம் செய்யப்பட்ட ஒளியின் தளம் சுழற்சிக்கு ஆளாகின்றது. இச்சுழற்சியின் அளவு, பிரதிபலிக்கும் பரப்பின் காந்தமாக்கச் செறிவைப் பொறுத்தது. எனவே வெவ்வேறு காந்த வயல்களிலிருந்து எதிரொளிக்கப்படும் தளவாக்கம் செய்யப்பட்ட ஒளி வெவ்வேறு செறிவுள்ளதாக இருக்கும். இது காந்தவயலின் தோற்றத்தைப் புலப்படுத்துவதாக இருக்கின்றது.

காந்த வயல்களின் தோற்றுவாய்

(Origin of Domains)

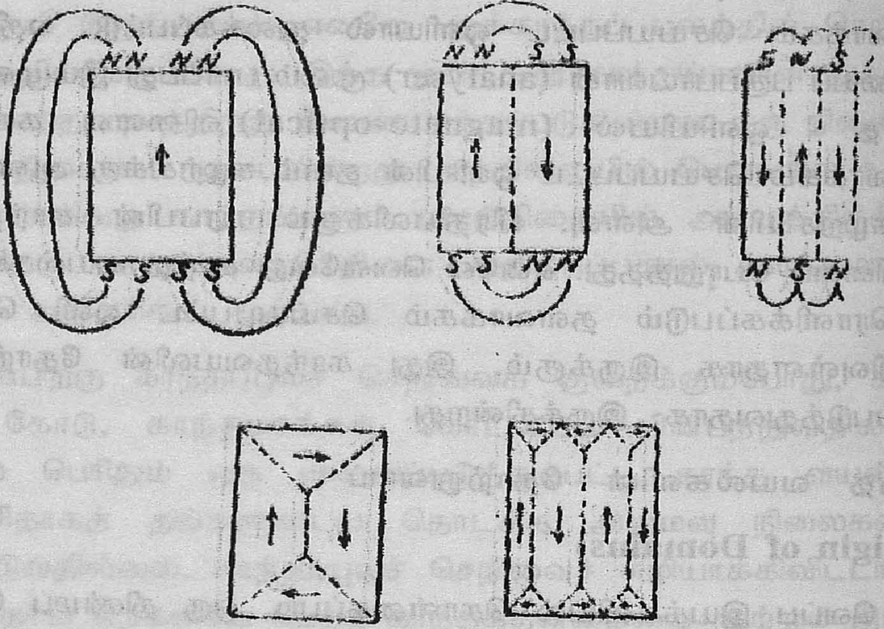
வெப்ப இயக்கவியல் கொள்கைப்படி, ஒரு திண்மப் பொருளின் தனி அல்லது இயலாற்றல் (free energy) சிறுமமாக இருக்கவேண்டும். இது காந்த வயல்களுக்கும் பொருந்தும். காந்த வயலை உருவாக்கி நிலையாக இருக்குமாறு செய்வதற்குக் காரணமான ஆற்றல் கூறுகளின் மொத்தம் சிறுமம் என்று இதன் மூலம் முடிவு செய்யலாம். ஒரு காந்த வயலின் ஆற்றல் கூறுகள் - காந்தப்புல ஆற்றல், பரிமாற்ற ஆற்றல், திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் (anisotropy energy) எனப்படும்.

காந்தப்புல ஆற்றல்

காந்த முனைகள் பொருளின் இருமுனைகளில் இருப்பதால், அது புறவெளியில் ஒரு காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றது. இப்புலத்தின் நிலையாற்றல் காந்தப்புல ஆற்றல் எனப்படும். இதன் மதிப்பு

$$E_m = 1/2\ \mu_o \int B^2\ dv$$

இதில் தொகுப்பாக்கம் காந்தப்புல வெளி முழுமையிலும் செய்யப்படுகின்றது. ஆற்றலின் பெரும் பங்கு இதில் அடங்கியிருக்கின்றது. காந்தப்புல வெளியைச் சுருக்குவதினாலும், காந்த முனைகள் பொருளின் முனைகளில் செறிவுற்றிருப்பதைத் தவிர்ப்பதாலும் காந்தப்புல ஆற்றலைக் குறைக்க முடியும்.



படம். 3.37 காந்த வயல்களின் தோற்றுவாய்

படம் 3.37 (அ)-ல் ஒரேயொரு காந்தவயல் மட்டுமே இருக்கின்றது. காந்த முனைகள் பொருளின் முனைகளில் செறிவாக இருப்பதால் காந்தப்புல ஆற்றல் பெருமமாக இருக்கும். உண்மையில் இது ஆற்றல் சமநிலையில் உள்ள அமைவு நிலையில்லை படம் 3-37(ஆ)ல் இருகாந்த வயல்கள் உள்ளன. இதனால் காந்த ஆற்றல் படம் 3.37(அ)க்கு உள்ளதில் பாதியாக இருக்கின்றது. இது முன்னதைக் காட்டிலும் கூடுதலான நிலைப்புத் தன்மையைப் பெற்றிருக்கின்றது. இதைப் பொதுமைப்படுத்தி ஒரு காந்தப் பொருளை நோக்குவோம். அதில் N காந்தவயல் இருப்பின், அதன் காந்தப்புல ஆற்றல் படம் 3.37(அ)-ல் காட்டப்பட்டுள்ள காந்தவயலின் காந்தப்புல ஆற்றலில் 1/N பங்காக இருக்கும் எனலாம். இதற்குக் காரணம் காந்தப் புல வெளியின் சுருக்கமேயாகும். படம் 3.37 (ஈ) மற்றும் (2) காட்டப்பட்டுள்ள காந்தவயல்களின் அமைப்பிற்குக் காந்தப்புல ஆற்றல் சுழியாகும். முக்கோண வடிவில் உள்ள காந்த வயல்கள், பொருளின் முனையில் செவ்வக வடிவக் காந்தவயலின் காந்தமாக்கத் திசைக்கு 45° கோணத்தில் அமைந்திருக்கின்றன. முக்கோணவடிவக் காந்த வயலில், காந்தப்பாயத்தின் போக்கு, திண்மப் பொருளின் பரிமாணத்திற்குள்ளேயே முற்றுப்பெறுகின்றது. அதனால் காந்தமுனைகள் திண்மப் பொருளின் விளிம்போர

முனைகளில் உருவாவதில்லை. காந்தத்திருப்புத் திறனின் செங்குத்துக்கூறு வரப்பிற்குக் குறுக்காகத் தொடர்ச்சியான மாறுதலுக்கு உள்ளாக வேண்டும் என்பதால், இக்காந்தமாக்கத்தால் எந்தக் காந்தப்புலமும் தோற்றுவிக்கப்படுவதில்லை. இதை வட்டச்சுற்றுக் காந்தவயல் (Closure domain) என்பர்.

பரிமாற்ற ஆற்றல்

இது ஒரு தனித்த அணுக் காந்தத்தைக் காந்தவயலின் சிறப்புத் திசையில் அமைந்திருக்குமாறு செய்வதற்குக் காரணமாகும் பரிமாற்ற இடைவினையின் ஆற்றலாகும். இதன் அளவு

$$E_e = -2J_e \sum S_i . S_j$$

இதன் மதிப்பு அடுத்தடுத்துள்ள தற்சுழற்சிகளின் திசையமைவுகளைப் பொறுத்தது. இரு தற்சுழற்சிகள் இணையாக இருந்தால் பரிமாற்ற ஆற்றல் குறையும். இது பெரிய அளவிலான காந்தவயல்களில் அனுகூலமாயிருக்கின்றது.

திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல்

பெரோ காந்தப் படிகங்களைக் காந்தமாக்கம் செய்யும்போது, காந்த மாக்கம் எடுத்துக் கொள்ளப்படும் படிகங்களின் அச்சைப் பற்றியதாக இருக்கின்றது என்பது தெரியவந்தது. அதனால் பெரோ காந்தப் பொருட்களைச் சில திசைகளில் எளிதாகக் காந்தமாக்கம் செய்யமுடியும். இதை எளிய திசை (easy direction) என்பர். சில திசைகளில் காந்தமாக்கத்தை எளிதாகச் செய்ய முடிவதில்லை. இதைக் கடின திசை (hard direction) என்பர். கடின திசைகளில் காந்தமாக்கம் செய்வதற்கு, எளிய திசையில் தேவைப்படுவதைவிட உயரளவு புறக்காந்தப்புலம் வேண்டும். எடுத்துக்காட்டாக உடல்மையக் கனச்சதுர இரும்புப் படிகத்திற்கு (100) என்ற படிக அச்சுத் திசை எளிய திசையாகும்; (111) என்ற படிக அச்சுத்திசை கடின திசையாகும். (110) திசை இரண்டிற்கும் இடைப்பட்ட இடைத்திசையாகும். முக மையக் கனச்சதுர நிக்கலில், எளிய, கடிய, இடைத் திசைகள் முறையே (111), (100), (110) படிக அச்சுகளாகும். கோபால்டில் அறுமுகப் படிக அச்சு (hexagonal crystal axis) மட்டுமே எளிய திசையாகும். பிற திசைகள் யாவும் கடிய திசைகளாகும்.

கடின திசையில் காந்தமாக்கம் செய்வதற்கு, எளிய திசையில் செய்வதற்குத் தேவையானதைவிடக் கூடுதல் காந்தப்புலம் தேவை என்பதால், கடின திசையில் காந்தமாக்கம் செய்வதற்குக் கூடுதல் ஆற்றல் தேவை என்றாகின்றது. இக்கூடுதல் ஆற்றல் திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் எனப்படும்.

காந்த வயல்கள் தோன்றியிருத்தல் என்பது சிறும ஆற்றல் அடிப்படையிலானது என்று பார்த்தோம். காந்தவயல்களைச் சிறுசிறு பகுதிகளாக வகுக்கக் காந்த ஆற்றல் குறையும் என்றாலும் இதைத் தொடர்ந்து செய்ய முடியாது. ஏனெனில் ஒரு காந்தவயலை இரண்டாக வகுக்கும்போது இடையில் சுவர் போன்று ஒரு வரப்பு தோற்றுவிக்கப்படுகின்றது. இச்சுவரின் ஆற்றல், அமைப்பின் ஆற்றலை அதிகரிப்பதால், ஒரு நிலைக்கு மேல் ஒற்றைக் காந்தவயலை மேலும் மேலும் சிறுசிறு காந்த வயல்களாக வகுக்கமுடியாது.

காந்த வயல்களை வகுப்பதால் காந்தப்புல ஆற்றல் குறைந்தாலும் சுழியாவதில்லை. ஆனால் முக்கோண வடிவக் காந்த வயல்களில் காந்தப்புல ஆற்றலைச் சுழியாக்க முடியும். காந்தப் பாயங்கள் காந்தப் பொருளுக்குள்ளேயே தொடங்கி முடிவடைந்தால், காந்தப்புலம் இவ்வமைப்புகளில் புறவெளிகளில் தோன்றுவதில்லை எனலாம்.

ஆனால் காந்த வயல்களின் இவ்வமைப்பும் சிறும ஆற்றல் அமைவு நிலைக்கு ஏற்புடையதாக இல்லை. இதற்குக் காரணம், இது மற்றொரு வகையான ஆற்றலை உட்புகுத்துகின்றது. இதைக் காந்தப் பரிமாண மாற்ற ஆற்றல் (Magnetostrictive strain energy) என்பர். பெரோகாந்தப் பொருட்களைக் காந்தமாக்கம் செய்யும்போது, பருமன் மாறாமல் அவற்றின் பரிமாணம் மாறுதலடைகின்றது. இரும்பைக் காந்தமாக்கம் செய்யும்போது, காந்தமாக்கம் செய்யப்படும் திசையில் நீட்சியும், இதற்கு நேர்குத்துத் தியையில் சுருக்கமும் பெறுகின்றது. நிக்கலில் காந்தமாக்கம் செய்யப்படும் திசையில் சுருக்கமும், குத்துத் திசையில் நீட்சியும் காணப்படுகின்றது.

படம்3.37(ச) ல் காட்டியபடிக் காந்தவயல்களை உருவாக்கினால், காந்தப் பரிமாணமாற்றம் காரணமாக படத்தில் கிடைமட்டமாக காந்தமாக்கம் செய்யப்பட்ட காந்தவயல்கள் ஓர் அழுக்கத்திற்கு

ஆளாகின்றன. இந்த அமுக்கத்தினால் காந்த வயல்களில் சேமிக்கப்படும் ஆற்றல் காந்தப்பரிமாண மாற்ற ஆற்றல் எனப்படும். சிறும ஆற்றல் அமைவு நிலைக்கு ஆற்றலின் இந்தக்கூறு மிகவும் குறைக்கப்பட வேண்டும். இதற்குக் காந்தப் பரிமாணமாற்றம் காரணமாக அமுக்கப்படும் குறுக்குக் காந்த வயல்களின் பருமனைக் குறைத்து, நெடுக்கக் காந்த வயல்களின் பருமனை அதிகரிக்க வேண்டும். இது படம் 3.37 (உ)-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதையும் தொடர்ந்து வகுத்து அதிகரித்துக் கொள்ளமுடியாது. ஏனெனில் அப்போது அதிகரிக்கும் காந்த வயல் இடைச்சுவர்களால் ஆற்றல் அதிகரிக்கின்றது. மொத்த ஆற்றலை அதிகரிக்காமல், ஆற்றல் கூறுகளின் பங்களிப்பைக் குறைக்க முனையும் அமைப்பே நிலையானதாக இருக்கின்றது என்பதால், வகுத்தலை ஒரு கட்டத்திற்கு மேல் தொடரமுடியாது

3.22 ப்ளாக் சுவர் (காந்தவயல்களின் இடைச்சுவர்)

பிளாக் சுவர்



காந்தவயல்-1 காந்தவயல்-2

படம் 3.38 ப்ளாக் சுவர்

ப்ளாக்கின் கருத்துப்படி வெவ்வேறு திசைகளில் காந்தமாக்கம் செய்யப்பட்ட இரு காந்த வயல்களின் எல்லைக் கோட்டில் இத்திசைமாற்றம் திடீரெனத் தாவிவிடுவதில்லை. மாறாக இம்மாற்றம் பல படிகத்தள இடைவெளியில் சீரான மாற்றமாக படம் 3.38 ல் காட்டியபடி நிகழ்கின்றது. இப்படி நிகழ்வதற்கான காரணம், கொடுக்கப்பட்ட மொத்த தற்சுழற்சியின் திசைத் திருப்பத்திற்கு, அம்மாற்றம் திடீரெனத் தோன்றுவதைக் காட்டிலும், பல தற்சுழற்சிகளோடு பகிர்வுற்றுத் தோன்றினால் பரிமாற்ற ஆற்றல் குறைவாக இருப்பதுதான்.

இணையான தற்சுழற்சியுடன்கூடிய இரு எலக்ட்ரான்களைக் கருதுவோம். இதன் பரிமாற்ற ஆற்றல்

$$E_e = 2J_eS^2$$

ஏனெனில் $S_1 = S_2 = S$. இதில் J_e என்பது பரிமாற்றத்தின் தொகுப்பாக்கமாகும். இரு தற்சுழற்சிகளும் θ என்ற கோணத்தில் சாய்ந்திருந்தால், அப்போது பரிமாற்ற ஆற்றல்

$$E_e = -2JeS^2 Cos\ \theta$$

θ சிறிய அளவெனில்

$$E_e = -2J_eS^2 [1 - \theta^2/2]$$

எனவே தற்சுழற்சிகளுக்கிடைப்பட்ட கோணத்தை 0 லிருந்து θ வரை அதிகரிக்கும்போது ஏற்படும் ஆற்றல் அதிகரிப்பு

$$JeS^2\theta^2 \qquad (3.93)$$

ஆகும்.

ப்ளாக் சுவருக்கும் (N+1) தற்சுழற்சிகளின் அணி வரிசை அமைவைக் கருதுவோம். இரு காந்த வயல்களின் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கத் திசைகளுக்கிடைப்பட்ட கோணம் o எனில்

$$\theta = \theta_o / N$$

எனவே தற்சுழற்சிகளின் வரிசைக்கான பரிமாற்ற ஆற்றல்

$$(E_e)\ \text{வரிசை} = N\,J_e S^2\theta = J_eS^2\theta_o^{\ 2} / N \qquad (3.94)$$

இங்கு இடைவினை அடுத்தடுத்துள்ள தற்சுழற்சிகளில் மட்டுமே இருப்பதாகக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. இதன்படி N அதிகரிக்க பரிமாற்ற ஆற்றல் குறைகின்றது. அதாவது பரிமாற்ற ஆற்றல் சுவரின் தடிப்பிற்கு எதிர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது.

இதன் பொருட்டுச் சுவரின் தடிப்பைப் பெரிதும் அதிகரித்துக் கொள்ள முடியாது. அப்போது திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் ஓர் எதிர்தாக்கத்தைச் செய்வதே இதற்குக் காரணமாக அமைகின்றது. சுவருக்குள் உள்ள தற்சுழற்சிகள் எல்லாம் எளிய திசையிலிருந்து விலகியிருக்கின்றன என்பதால் இது விசையின் அழுத்தத்திற்கு உள்ளாகின்றது. எனவே திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் சுவருக்குக் கிடைக்கின்றது. இதன் மதிப்பு ஏறக்குறைய சுவரின் தடிப்பிற்கு

நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. சிறும ஆற்றல் அமைவிற்கு இவ்வாற்றல் கூறு சிறுமமாக இருக்க வேண்டும் என்பதால், ப்ளாக் சுவர் பெரிதும் தடிப்புள்ளதாக இருப்பதில்லை. பரிமாற்ற ஆற்றல் மற்றும் திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் இவைகளின் சமநிலையே ப்ளாக் சுவரின் தடிப்பைத் தீர்மானிக்கின்றது.

இனி ப்ளாக் சுவரின் தடிப்பு மற்றும் ஆற்றலின் மதிப்புகளைத் துல்லியமாக இல்லாவிட்டாலும் தோராயமாக அறிந்து கொள்ள முற்படுவோம்.

எளிமைக்காக, ப்ளாக் சுவர் ஓர் எளிய கனச்சதுரப் படிகத்தின் முகப்பரப்பிற்கு இணையாக இருப்பதாகவும், சுவருக்கு இருமருங்கும் நேர் - எதிர் திசைகளில் காந்தமாக்கம் செய்யப்பட்டிருப்பதாகவும் கொள்வோம். சுவரின் ஓரலகுப் பரப்பின் ஆற்றலைத் துல்லியமான தோராயமாக, பரிமாற்ற ஆற்றல், திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் இவற்றின் கூடுதலாகக் கருதலாம்.

$$E = (E_e)_{\text{பரப்பு}} + E_a$$

(E_e) வரிசை-ன் மதிப்பை, ஓரலகுப் பரப்பிலுள்ள அணுவரிசைகளின் எண்ணிக்கை $1/a^2$ ஆல் பெருக்க (E_e) பரப்பு கிடைக்கும்.

$$(E_e)_{\text{பரப்பு}} = J_e S^2 \pi^2 / Na^2$$

இங்கு $\theta_o = \pi$ எனக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. திசையொவ்வாப் பண்பாற்றல் என்பது திசையொவ்வாப்பண்பு மாறிலி (anisotropy constant) K மற்றும் சுவரின் பருமன் (Na) இவற்றின் பெருக்கல் பலனுக்கு ஏறக்குறையச் சமமாக இருக்கின்றது. எனவே ஓரலகுப் பரப்பிற்கான மொத்த ஆற்றலை

$$E = JeS^2\pi^2 / Na^2 + kNa$$

என்று குறிப்பிடலாம். இதில் a என்பது படிக மாறிலியாகும். N-ன் மதிப்பு சிறும ஆற்றல் அமைவு நிலையால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. எனவே $dE / dN = 0$ என்ற அதற்கான பொது நிபந்தனையைக் கொண்டு

$$N = (J_e S^2 \pi^2 / Ka^3)^{1/2}$$

என மதிப்பிட்டறியலாம்.

ஓர் எடுத்துக்காட்டாக இரும்பைக் கருதுவோம்.

இரும்பிற்கு $J_e = k_B\theta/3$; $k = 10^2$ ஜுல்/மீ^{2}, $S = ½$; $N = 300a$; (t என்பது சுவரின் தடிப்பு) பிளோஷ் சுவரின் ஓரலகுப் பரப்பிற்கான ஆற்றலை இதைக்கொண்டு கண்டறிய முடியும்.

$$E = 2s\pi\,(J_e k / a)^{1/2}$$

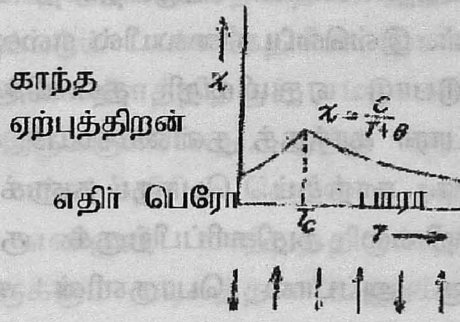
இரும்பிற்கு இதன் மதிப்பு 10^{-3} ஜுல் / மீ^{2} ஆக உள்ளது.

இவ்வழிமுறையில் தற்சுழற்சியின் மொத்த மாற்றத்தை ப்ளாக் சுவரின் குறுக்காக ஒரு வரிசையில் அமைந்துள்ள N அணுக்கள் சமமாகப் பங்கிட்டுக் கொள்கின்றன என்பதும், திசையொவ்வாப் பண்பாற்றலை மதிப்பீடு செய்யும் வழிமுறை தோராயமாக்கப்பட்ட முறையும் முழுமையாக ஏற்றுக்கொள்ளத்தக்கதாக இல்லை. மிகத் திருத்தமான மதிப்பீடு இரும்பின் (100) தளத்திற்கு 1.8×10^{-3}ஜுல்∴ மீ^{2} என்று தெரிவித்துள்ளன.

3.23. எதிர்பெரோ காந்தப்பண்பு (anti ferromagnetism)

எதிர்பெரோ காந்தப் பொருட்கள், பெரோ காந்தப்பொருட்களிலிருந்து மாறுபட்ட காந்தப் பண்புகளைப் பெற்றிருக்கின்றன. கொள்கை வாயிலாக இதை முதலில் நீல் (Neel) மற்றும் பிட்டர் (Bitter) போன்ற விஞ்ஞானிகளும், பின்னர் வான்வெலக் என்பாரும் தெரியப்படுத்தினார்கள். சோதனை மூலம் எதிர்பெரோ காந்தத்தை முதலில் 1938-ல் பைசெட் (H.Bizette) ஸ்கொயர் (C.F.Squire) மற்றும் ஸாய் டீ.வுளயடை போன்ற ஆராய்ச்சியாளர்கள் மாங்கனீசு ஆக்ஸைடு (MnO) என்ற கூட்டுப்பொருளின் ஒரு சிறப்புப் பண்பாகக் கண்டறிந்தார்கள்.

ஓர் எதிர் பெரோ காந்தப் பொருளின் காந்த ஏற்புத் திறனுக்கும் சார்பிலா வெப்பநிலைக்கும் ஒரு வரைபடம் வரைந்தால் அது படம் 3.39-ல் காட்டியவாறு இருக்கும். காந்த ஏற்புத்திறன் வெப்பநிலை அதிகரிப்பிற்கு ஏற்ப ஒரு பெருமத்தை எட்டுவது எதிர் பெரோ காந்தத்தின் சிறப்புத் தன்மையாகும்.



படம். 3.39-ல் எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளின் காந்த ஏற்புத் திறனுக்கும் வெப்பநிலைக்குமான வரைபடம்

இப்பெருமம் ஏற்படுகின்ற வெப்பநிலையை நீல் வெப்பநிலை என்பர். இதை $T_{நீல்}$ என்று குறிப்பிடுவர். பெரோ காந்தப் பொருட்களில் பெரோ காந்த கியூரி வெப்பநிலை ஏற்கும் பங்கினையே நீல் வெப்பநிலை எதிர்பெரோ காந்தப் பொருட்களில் ஏற்படுகின்றது. எதிர் பெரோ காந்தப் பொருட்களுக்கு, நீல் வெப்பநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில் காந்த ஏற்புத்திறன் $x = C/(T+\theta)$ என்ற தொடர்புக்கு உட்பட்டு மாற்றம் அடைகின்றது. இதில் C என்பது கியூரி மாறிலி, θ என்பது பாரா காந்த கியூரிவெப்பநிலை ஆகும்.

எதிர் பெரோ காந்தத்திலும், பெரோ காந்தம் போலப் பரிமாற்ற இடை வினை முக்கியப் பங்கேற்றுள்ளது. அடுத்தடுத்துள்ள படிகத் தளங்களிலுள்ள அணுக்களின் தற்சுழற்சிகள் ஒன்றுக்கொன்று எதிராக இருக்கும் போது பரிமாற்ற ஆற்றல் எதிர்குறியுடையதாக இருக்கின்றது. இதற்குப் படிகத்தளங்களுக்கு இடைப்பட்ட தொலைவே முக்கியக் காரணமாக இருக்கின்றது. தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில், குறிப்பாக நீல்வெப்பநிலைக்குக் குறைந்த வெப்பநிலைகளில் இதுபோன்ற அமைப்பு நிலைப்புத்தன்மை மிக்கதாக இருக்கின்றது. ஒன்றுவிட்ட (ஒற்றையெண்) படிகத்தளங்களில் காந்தமாக்கம் ஒரு திசையிலும், அடுத்தடுத்த (இரட்டையெண்) படிகத்தளங்களில் காந்தமாக்கம் எதிர்திசையிலும் இருப்பதால், புறக்காந்தப்புலம் சுழியாக இருக்கும்போது எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளின் காந்தத்திருப்புத் திறனும் சுழியாக இருக்கின்றது. புறகாந்தப்புலத்தின் செறிவை அதிகரிக்க, காந்தப்புலத் திசையில் எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளின் காந்தத்திருப்புத் திறன் குறைவான அளவில் அதிகரிக்கின்றது. வெப்பநிலை அதிகரிக்க இடைவினையின் செயல்திறன் குறைவதால், காந்தத் திருப்பு திறன் அதிகரிக்கின்றது.

ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் பெருமத்தை எட்டுகின்றது. இதை நீல்வெப்பநிலை என்பர். இவ்வெப்பநிலையில் எல்லாத் தற்சுழற்சிகளும் இடைவினையில் ஈடுபாடு ஏதுமின்றி தன்னிச்சையானவைகளாக இருக்கின்றது. இது பாரா காந்தத் தன்மையைச் சுட்டிக் காட்டுவதாக இருக்கின்றது. பாரா காந்தப் பொருட்களுக்கு அதன் காந்த ஏற்புத்திறன், வெப்பநிலை அதிகரிப்பிற்குக் குறையும் என்பதால், நீல் வெப்பநிலைக்கு அப்பால் பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் வெப்பநிலை அதிகரிப்பிற்கு ஏற்பக் குறைகின்றது. எனவே நீல் வெப்பநிலை என்பது எதிர் பெரோ காந்தத்திலிருந்து பாராகாந்தத்திற்கு நிலைப்பெயர்வு செய்யும் வெப்பநிலை என்று கூறலாம்.

இதன் மதிப்பு வெவ்வேறு எதிர்பெரோ காந்தப் பொருட்களுக்கு வெவ்வேறு மதிப்புடையதாக இருக்கின்றது.

அட்டவணை 3.4

எதிர்பெரோ காந்தப் பொருட்களும் நீல் வெப்பநிலையும்

எதிர்பெரோ காந்தப் பொருள்	நீல் வெப்பநிலை கெல்வின்
$NiSo_4$	37
$FeSo_4$	21
Ni o	520
Fe o	188
Ni F_2	73.2
Fe F_2	78.3

படிகத்தளங்களில் உள்ள அணுக்களின் பங்கீட்டுத்தனத்தையும், அணித்தள இடைவெளியையும், எக்ஸ்கதிர் மூலம் ஆராய முடியும். பல்வேறு இணைப் படிகத்தளங்களினால் எதிரொளிக்கப்படும்

எக்ஸ்கதிரின் செறிவை அளவிட்டறிவதால் இது இயலுவதாகின்றது. இதில் பயன்படுத்தப்படும் எக்ஸ்கதிரின் ஒளியியல் பாதைகளின் வேறுபாடு, அதன் அலைநீளத்திற்குச் சமமாகவோ அல்லது அதன் மடங்குகளாகவோ இருக்கும்போது, ஒத்த படிகத்தளங்களிலிருந்து எதிரொளிக்கப்படும் எக்ஸ்கதிரின் செறிவை அதிகமாக இருக்குமாறு செய்யமுடிகின்றது எனினும் காந்தத்திருப்புதிறனின் வெவ்வேறு திசைமுகப்புடன் இருக்கும் படிகத்தள அணுக்களை எக்ஸ்கதிர்கள் இனமறிவதில்லை. எனவே எக்ஸ்கதிர் கட்டமைப்புப் பகுப்பாய்வு மூலம் எதிர்பெரோ காந்தப் பொருட்களின் கட்டமைப்பைத் தெரிந்து கொள்ள முடிவதில்லை.

எலக்ட்ரான்கள் குவாண்டம் பண்புகளைக் கொண்டுள்ளன என்பதாலும், அலைப்பண்பினால் இடைவினை புரியக்கூடியதாக உள்ளது என்பதாலும் எக்ஸ்கதிர்களைப் போல எலக்ட்ரான்களையும் படிக ஆய்வில் பயன்படுத்தலாம். எலக்டரான்கள் காந்தத்திருப்பு திறன் கொண்டவைகளாக இருப்பதால், வெவ்வேறு காந்தத்திருப்புத்திறன் கொண்ட படிகத்தள அணுக்களுடன் வெவ்வேறு விதமாக இடைவினை புரிகின்றன. இருப்பினும் எதிர் பெரோ காந்தப் பொருளின் படிகக் கட்டமைப்பை அறிவதற்கு எலக்ட்ரான்களால் முடிவதில்லை. ஏனெனில் மின்விசை காரணமாக விளையும் இடைவினை, காந்தத்திருப்புத்திறன் காரணமாக எழும் இடைவினையை விட $(137)^2$ மடங்கு அதிமாக இருக்கின்றது. எனவே நேர் எதிர் திசைகளில் திசையமைவு கொண்ட காந்தத் திருப்புத்திறனுடன் கூடிய ஒத்த அணுக்கள் எலக்ட்ரான்களை ஏறக்குறைய ஒரே மாதிரியாகச் சிதறலுக்கு உள்ளாக்குகின்றன.

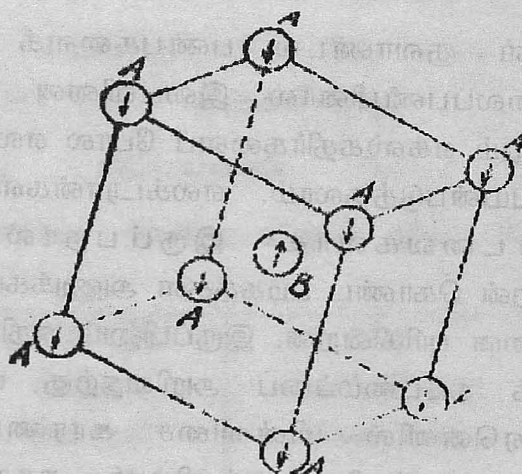
எதிர்காந்தப் பொருளின் படிகக்கட்டமைப்பை நியூட்ரான் சிதறல் மூலம் உறுதி செய்ய முடியும். எலக்டரானை விட நிறைமிக்கது என்பதால் நியூட்ரானின் காந்தத்திருப்புத்திறன் குறைவானது. மேலும் நியூட்ரான் மின்னூட்டமற்றது. நியூட்ரான் சிதறலின் பங்கீட்டுத்தனத்தைக் கொண்டு அணுக்களின் படிகத்தளக் கட்டமைப்பை அறியமுடியும். நியூட்ரான் சிதறலின் பங்கீட்டுத் தனம், அணுக்கருவை மட்டுமின்றி நியூட்ரானின் காந்தத்திருப்புத் திறனுக்கும், படிகத்தளத்திலுள்ள அணுவின் காந்தத் திருப்புத் திறனுக்கும் இடைப்பட்ட இடைவினையையும் பொறுத்தது. எனவே எதிர்பெரோ காந்தப்பொருள் நியூட்ரான் சிதறலுக்கு உள்ளாகும் போது, கூடுதலான

விளிம்பு விளைவு வரிகளைத் தோற்றுவிக்கின்றன. இதுவே எதிர்பெரோ காந்தப்பொருட்களை இனம்காட்டும் சோதனைச் சான்றாகக் கருதப்படுகின்றது.

எதிர்பெரோ காந்தத்தன்மைக்கான மூலக்கூறுக்கூறு புலக்கொள்கை

(Molecular field theory of Antiferro magnetism)

ஓர் எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளின் உடல்மையக் கனச்சதுர படிகத்தைக் கருதுவோம்.



படம் 3.40. எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளொன்றின் உடல்மையக் கன சதுர படிகமும், படிகத்தள அணுக்களின் காந்தத்திருப்புதிறனின் திசையமைவும்

எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளொன்றின் உடல்மையக் கனச் சதுர படிகத்தில் அடுத்தடுத்துள்ள A,B என்ற இருவகையான படிகத்தளங்களை எடுத்துக்கொள்வோம். ஒவ்வொரு A வகை அணுவைச் சுற்றி அருகாமையில் B வகை அணுக்கள் மட்டும் இருப்பதாகவும், அதைப்போல ஒவ்வொரு B வகை அணுவைச் சுற்றி அருகாமையில் A வகை அணுக்கள் மட்டும் இருப்பதாகவும் கொள்வோம். இவ்வமைப்பில் மூன்று வகையான இடைவினைகள் இருக்கின்றன. அவை A வகை அணுக்களுக்கிடையிலான வினை, B வகை அணுக்களுக்கிடையிலான வினை மற்றும் A,B வகை அணுக்களுக்கிடையிலான வினை ஆகும். இதில் A,B வகை அணுக்களுக்கிடையிலான வினை, பிற வினைகளை விட வலுவானது.

புறக்காந்தப்புலம் B ஒரு பெரோ காந்தப்பொருளில் செயல்படும்போது, இந்த வினைகளின் காரணமாக, A மற்றும் B வகை அணுக்களடங்கிய படிகத்தளங்களில் காந்தப்பாயச்செறிவு வேறுபட்டதாக இருக்கின்றது. இதை முறையே B_A என்றும் B_B என்றும் குறிப்பிடுவோம்.

$$\left.\begin{aligned} B_A &= B - \lambda_{AA}I_A - \lambda_{AB}I_B \\ \\ B_B &= B - \lambda_{BA}I_A - \lambda_{BB}I_B \end{aligned}\right\} \quad (3.95)$$

இதில் I_A, I_B என்பன A மற்றும் B படிகத்தளங்களில் காந்தமாக்கச் செறிவாகும். λ_{AA}, λ_{BB} என்பன ஒத்த தற்சுழற்சியுடைய ஒரே படிகத்தளத்தில் அருகாமையில் அமைந்துள்ள அணுக்களின் இடை வினைத் தரத்தை மதிப்பிடும இயற்பியல் கூறுகளாகும். இதைப் படிகத்தள அகப்புலமாறிலி அல்லது வெயிஸ்மாறிலி என்று குறிப்பிடுவர். λ_{AB} என்பது மாறுபட்ட தற்சுழற்சியுடைய அடுத்தடுத்த படிகத் தளத்தில் அருகாமையிலுள்ள அணுக்களின் இடைவினைத் தரத்தை மதிப்பிடும் இயற்பியல் கூறாகும். இதில் எதிர்குறி தோன்றியிருப்பதற்குக் காரணம், பரிமாற்றத் தொகுப்பாக்கம் எதிர்குறியுடையதாக இருப்பதுதான்.

பெரோ காந்தத் தன்மைக்கான குவாண்டம் கொள்கைப்படி A படிகத்தளத்திற்கான காந்தமாக்க செறிவு (சமன்பாடு 3.57).

$$I_A = \tfrac{1}{2} N g_J\ J \mu_B\, [B_J(x)]$$

எதிர் பெரோ காந்தப் பொருட்களில் இடைவினை, தற்சுழற்சியால் ஆனது என்பதால் மொத்தக் கோண உந்தக் குவாண்டம் எண் J-க்குப் பதிலாக மொத்தத் தற்சுழற்சி கோண உந்தக்குவாண்டம் எண் S-யைப் பயன்படுத்தலாம். மொத்த அணுக்களில் பாதி A வகைப் படிகத் தளத்திலும், மீதிப் பாதி B வகைப் படிகத் தளத்திலும் அமைந்திருப்பதால் N-க்குப் பதிலாக N/2 பயன்படுத்தப்பட்டுள்ளது. N என்பது ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையாகும். எனவே

$$I_A = N/2\ g\ \mu_B\ S\ [B\ (x)]$$

இதில் $x = Sg\mu_B B_A / k_B T$

பிரிலோயின் சார்பு

$$B(x) = 2S+1/2s\ \mathrm{Cot\ h}\ (2S + 1/2S)\ x - 1/2S\ \mathrm{Cot\ h}\ (x/2S)$$

இதைப்போல B என்ற படிகத்தள அணுக்களுக்கும் குறிப்பிட முடியும்.

புறக்காந்தப்புலம் சுழியாக இருக்கும்போது A மற்றும் B வகை படிகத்தளங்களில் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் தோன்றியிருக்கின்றது. நீல் வெப்பநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில் எதிர் பெரோ காந்தத்தன்மை நீடித்திருப்பதில்லை.

நிலை (1) $T > T_N$

இந்நிலையில் வழிமுறை பெரோ காந்தத்திற்கான குவாண்டம் கொள்கையை ஒத்திருக்கின்றது. x-ன் தாழ்ந்த மதிப்பிற்கு ஜசமன்பாடு 3.59]

$$B\ (x) = [S + 1 / 3S]\ (x)$$

எனவே

$$I_A = Ng^2\ \mu_B^2\ S(S+1)\ B_A / 6k_B T$$

இதில் B_A - ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$I_A = Ng^2\ \mu_B^2\ S\ (S+1) / 6\ k_B T\ [B - \lambda_{AA}\ I_A - \lambda_{AB}\ I_B]$$

இதைப்போல.

$$I_B = Ng^2 \mu_B^2\ S(S+1) / 6\ k_B T\ [\ B - \lambda_{BB}\ I_B - \lambda_{BA}\ I_A]$$

இரு படிகத் தளத்திலும் உள்ள அணுக்கள் ஒத்தவைகளாக இருந்தால்

$$\lambda_{AA} = \lambda_{BB} = \alpha$$

$$\lambda_{AB} = \lambda_{BA} = \beta$$

மேலும் எதிர் பெரோ காந்தப் பொருளின் மொத்த காந்தமாக்கச் செறிவு, இவ்விரு தளங்களின் காந்தமாக்கச் செறிவுகளின் கூடுதலாகும்.

$$I = I_A + I_B$$

$$= Ng^2\mu_B{}^2 S(S+1) / 6k_BT\,[2B - (I_A + I_B)(\alpha + \beta)]$$

மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனை

$$\chi = I/H = \mu_o N^2 g^2 \mu_B{}^2 S(S+1)/3RT\,[1 - x/2\mu_o\,(\alpha+\beta)]$$

$$= C/T\,[1 - x/2\mu_o(\alpha+\beta)]$$

அல்லது,

$$\chi_{\text{எதிர்பெரோ}} = C/T + \theta \quad \text{இங்கு} \quad \theta = C(\alpha+\beta)/2\mu_o \qquad (3.96)$$

இதில் θ-ன் மதிப்பு நேர்குறி உடையதாக மட்டுமிருக்கின்றது. எனவே உயர் வெப்ப நிலைகளில் எதிர்பெரோ காந்தம், பாரா காந்தம் போலச் செயல்படுகின்றது. பெரோகாந்தப் பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்பில் (T +θ)-க்குப் பதிலாக (T -θ) இருப்பது கவனிக்கத்தக்கது.

நீல் வெப்பநிலை

வெப்பநிலை குறையக் குறைய பாரா காந்தத்தன்மை அதிகரிக்கின்றது. நீல் வெப்பநிலையில் இப்போக்கு மாறிவிடுகின்றது. இந்த வெப்பநிலைகூடக் காந்தத்தெவிட்டு நிலையை ஏற்படுத்துவதில்லை. மேலும் $T = T_N$ என்ற நிலை, எதிர்பெரோ காந்தத்தின் தூண்டலற்ற காந்தத்தன்மை நிலைத்திருப்பதற்கான இறுதி நிலையாகும். எனவே B =o என்றால்

$$I_A = C/2\mu_o T_N\ [-\alpha I_A - \beta I_B]$$

அல்லது $I_A\,[1 + C\alpha/2\mu_o T_N] + (C\beta/2\mu_o T_N)\ I_B = o$

இதைப்போல

$$I_B = C / 2\mu_o T_N [-\alpha I_B - \beta I_A] \quad (3.97)$$

அல்லது $$I_B [1 + C\alpha / 2\mu_o T_N] + (C\beta / 2\mu_o T_N) I_A = o \quad (3.98)$$

இது $[1 + C\alpha / 2T_N\mu_o + C\beta / 2T_N\mu_o] (I_A + I_B) = o$ என்று தெரிவிப்பதால் $[I_A] = [I_B]$ என்று முடிவு செய்ய வேண்டியிருக்கின்றது. எனவே $T = T_N$ என்ற நிலையில் அடுத்தடுத்த படிகத்தளங்களின் தூண்டலற்ற காந்தத் தன்மைகள் சமமாகி விடுகின்றன. I_B-ன் மதிப்பை ஒரு சமன்பாட்டிலிருந்து பெற்று, மற்றொரு சமன்பாட்டில் பதிலீடு செய்ய

$$(1 + C\alpha / 2\mu_o T_N)^2 - (C\beta / 2\mu_o T_N)^2 = O$$

அதாவது $T = T_N$ என்ற நிலையில் I_A, I_B-யின் சுழியில்லா மதிப்புகளாலான தீர்வுக்கு அவற்றின் குணகங்களாலான அணிக்கோவை சுழியாக இருக்க வேண்டும்.

$$\begin{vmatrix} 1 + C\alpha / 2\mu_o N & C\beta / 2\mu_o TN \\ C\beta / 2\mu_o T_N & 1 + C\alpha / 2\mu_o T_N \end{vmatrix} = o$$

இது.

$$T_N^2 + C\alpha / \mu_o T_N + C^2/4\mu_o^2 (\alpha^2 - \beta^2) = o$$

என்ற நிபந்தனைத் தொடர்பைத் தருகின்றது. இது ஓர் இருபடிச் சமன்பாடு. T_N-ன் மதிப்பைத் தீர்வு செய்தால்,

$$T_N = - C\alpha \pm \sqrt{C^2 \alpha^2 - C^2 (\alpha^2 - \beta^2)} / 2\mu_o$$

$$= C (\beta - \alpha) / 2\mu_o \quad (3.99)$$

இத் தொடர்பிலிருந்து AB வகை இடைவினை வலிமையாக இருந்தால் நீல் வெப்பநிலை அதிகமாக இருக்கும் என்றும், AA மற்றும் BB வகை இடை வினைகள் வலுவடைய T_N-ன் மதிப்பு

குறையும் என்றும் கூறலாம்.

நீல் வெப்பநிலை - கியூரி வெப்பநிலை தொடர்பு

சமன்பாடு (3.99) லிருந்து $T_N = C(\beta - \alpha) / 2\mu_o$

சமன்பாடு (3.96) லிருந்து $\theta = C(\beta + \alpha) / 2\mu_o$

இவ்விரு சிறப்பு வெப்பநிலைகளின் தகவு

$$T_N / \theta = \beta - \alpha / \beta + \alpha \tag{3.100}$$

சோதனைகள் $T_N < \theta$ ஆக இருப்பதை உறுதிபட நிறுவியுள்ளன. இது நேர்குறி உடையதாக இருக்க வேண்டும் என்று தெரிவிக்கக் கூடியதாக உள்ளது.

நிலை (2) $T < T_N$

நீல் வெப்பநிலைக்குக் கீழ் எதிர் பெரோ காந்தப்பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனைப் பற்றி இனி அறிவோம். எளிமைக்காக அமைப்பில் AB வகை இடைவினை மட்டும் இருப்பதாகக் கொள்வோம்.

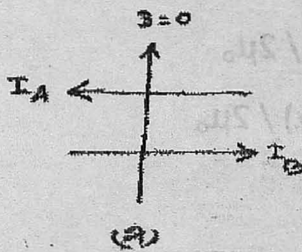
$$\lambda_{AA} = \lambda_{BB} = \alpha = 0$$

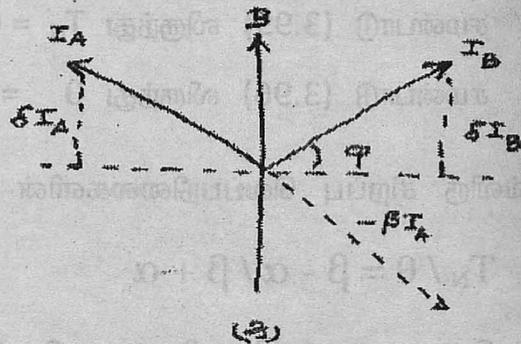
$$\lambda_{AB} = \lambda_{BA} = \beta \neq 0$$

இந்நிலையில் அமைப்பில் இருவேறு அகநிலைகளைக் கருதலாம். முதலாவது அகநிலையில் செயல்படுத்தப்படும் புறக்காந்தப்புலம் தற்சுழற்சி அச்சுக்குச் செங்குத்தாக இருக்கின்றது.

$B \perp I_A$ மற்றும் I_B

இரண்டாவது அகநிலையில் இவையிரண்டும் இணையாக இருக்கின்றன.





படம் 3.41 B I_A, I_B ($T < T_N$) எதிர்பெரோ காந்தப்படிகத்தளங்கள்

புறக்காந்தப்புலம் செயல்படும் போது A, B தளங்களில் உள்ள தற்சுழற்சி, புலத்திசையை நோக்கித் திரும்புவதால், அவைகளுக்கிடைப்பட்ட கோணம் 2ϕ ஆக இருக்கும். ஆனால் எதிர் காந்தப் பொருளில் இத்தற்சுழற்சிகள் எதிரிணையாக இருக்க முனைவதால், இந்த இயக்கத்தில் ஒரு சமநிலை ஏற்படுகின்றது.

B தளத்தில் புறகாந்தப் புலத்திசைக்கு இணையாகச் செயல்படும் மூலக்கூறு புலத்தின் வலிமை

$$-\ \beta I_A . 2\phi$$

ϕ சிறிய அளவினதாகக் கருதப்பட்டுள்ளது. சமநிலையில் இது புறகாந்தப்புலத்திற்குச் சமமாகவும், எதிராகவும் செயல்பட வேண்டும் என்பதால்

$$\beta I_A 2\phi = B$$

$I_A = I_B$ என்று கொண்டால் புறகாந்தப் புலத்திசையில் காந்தமாக்கச் செறிவு

$$I = (I_A + I_B)\ \phi$$

$$= 2I_A\ \theta = 2I_B\ \phi$$

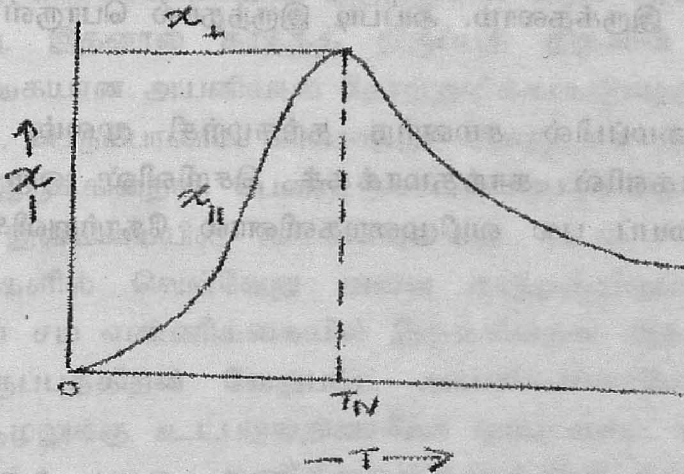
அல்லது $I = B / \beta$

எனவே காந்த ஏற்புத்திறன்,

$$(x)_{\perp} = I / H = \mu_o / \beta \qquad (3.101)$$

இது வெப்பநிலை சார்பில்லாதிருக்கின்றது. மேலும் ஒரு மாறிலியாகவும் இருக்கின்றது.

மற்றொரு அகநிலையில், புறகாந்தப் புலத்திசைக்கு இணையான திசையில் காந்த ஏற்புத்திறனை x_{11} மதிப்பிடுவது மிகவும் சிக்கலானது. வான்வெலக் என்பார் தன்னுடைய கொள்கையின் மூலம் எதிர் பெரோ காந்தப் பொருள்களுக்கு x_{11} சுழியிலிருந்து $x_{(TN)}$ வரை சீராக, வெப்பநிலை அதிகரிக்க, அதிகரிக்கின்றது என்று கண்டறிந்தார். சுழிவெப்பநிலையில் எல்லாத் தற்சுழற்சிகளும் புலத்திசைக்கு இணையாகவோ இல்லை எதிரிணையாகவோ இருக்கும். அதனால் அவற்றின் மீது சுழற்சி விசை ஏதும் செயல்படாது. அதனால் காந்தமாக்கம் ஏதுமில்லாதிருக்கும். அதாவது $x_{11} \rightarrow o$. $T \rightarrow o$ k என்ற



படம் 3.42. எதிர்பெரோ காந்தப் பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனின் வெப்பநிலை சார்ந்த வேறுபாடு

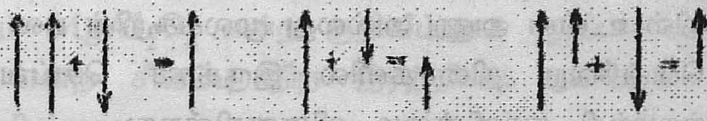
போது வெப்பநிலைச் சார்பற்ற $x_{\perp}$ நீல் வெப்பநிலையில் பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனுக்குச் சமமாக இருக்கும். தொடர்பு (3.101)ஐ $\alpha \neq 0$ என்ற நிலையிலும் பெறமுடியும். சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் $x_{11}=0$. இதன் மதிப்பு வெப்பநிலை அதிகரித்து நீல்வெப்பநிலையை எட்டும் வரை சீராக அதிகரிக்கின்றது.

ஒரு பொருளை ஈர்ப்புக்கு எதிராகச் சற்று உயரத்தூக்கி அந்தரத்தில் மிதவலாக நிற்குமாறு செய்ய பொருட்களின் இந்த எதிர்பெரோ காந்தப் பண்பு பயன்தருகின்றது. இப்புதிய பண்பினைக் கொண்டு தண்டவாளமில்லாத அதிவேக இரயில் வண்டிகளை இயக்க முடியும். இது தொழில் நுட்பத்துறையில் புதிய அணுகுமுறைகளைப் படைத்திருக்கின்றது.

3.24. பெரி காந்தத் தன்மை (Ferrimagnetism)

பெரிகாந்தம், எதிர் பெரோ காந்தத்தின் ஒரு சிறப்பு நிலையாகும். அடுத்தடுத்த படிக அணித்தளங்களின் காந்தமாக்கச் செறிவு சமமாகவும், எதிராகவும் இருந்தால் அது எதிர் பெரோ காந்தம் என்று அறிவோம். படிக அணித்தளங்களில் உள்ள அணு அல்லது மூலக்கூறுகளின் தன்மையைப் பொறுத்து இவை எதிராகவும், சமமின்றியும் இருக்கலாம். அப்படி இருந்தால் பொருள் பெரிகாந்தம் எனப்படும்.

ஓர் அமைப்பில் சமனற்ற தற்சுழற்சி மூலம், அடுத்தடுத்த படிகத்தளங்களில் காந்தமாக்கச் செறிவில் ஒரு குறிப்பிட்ட சமனின்மையைப் பல வழிமுறைகளினால் தோற்றுவிக்கமுடியும்.





படம். 3.43. சமனற்ற தற்சுழற்சிகள் மூலம் பெரிகாந்தம் தோன்றக் காரணமாகும் பலவிதமான வழிமுறைகள்

படம் 3.43(அ): படிக அணித்தளங்களில் ஒத்த காந்தத்திருப்புத் திறன் உடைய தற்சுழற்சிகள் வெவ்வேறு எண்ணிக்கையில் அமைந்திருக்கின்றன. இதுபோன்று வெவ்வேறு அளவில் காந்தமாக்கச் செறிவிற்குப் பங்களிப்புச் செய்யக்கூடிய படிக அணித்தளங்களுடன் எதிர்காந்தப் பொருட்களிலும் இருக்கலாம். படம் 3.43 (ஆ): ஒரு படிக அணித்தளத்தில் வெவ்வேறு காந்தத் திருப்புத்திறனுடைய இருவகையான அயனிகள் இருக்க, அதில் ஒரு வகையான அயனி மட்டும் அதே எண்ணிக்கையில் அடுத்துள்ள படிக அணித்தளத்தில் இருக்கின்றது. இதனால் காந்தத் திருப்புத் திறனின் தொகுபயன் மற்றொரு வகையான அயனியால் தோற்றுவிக்கப்படுவதற்குச் சமமாக இருக்கின்றது. பெரும்பாலான பெரிகாந்தப் பொருட்கள் இவ்வகையைச் சார்ந்ததாக இருக்கின்றன. பெரைட்டுகள் எனப்படுகின்ற பெரிகாந்தப் பொருட்கள் இவ்வகையில் அடங்கியுள்ளன. படம் 3.43(இ): படிக அணித்தளங்களில் வெவ்வேறு அளவு காந்தத்திருப்புதிறனுடைய தற்சுழற்சிகள் சம எண்ணிக்கையில் இருக்கின்றன. இந்த வேறுபட்ட காந்தத் திருப்புத்திறன் வேறுபட்ட அயனிகளினாலோ, அல்லது வேறுபட்ட சூழலுக்கு உட்படுவதினாலோ ஏற்படலாம். படம் 3.43(ஈ) : அடுத்தடுத்த படிக அணித்தளங்களுக்கிடையே இருக்கும் இடைவினையுடன், ஒரே படிக அணித்தளத்தில் இடம் பெற்றுள்ள அயனிகளுக்கிடையேயும் வலுவான இடைவினை ஏற்படலாம். அப்போது இது போன்று தற்சுழற்சிச் சமனின்மை ஏற்படுகின்றது. படம் 3.43 (2): வலுவான வட்டார விசையாகத் திசையொவ்வாப்

பண்பு விசை செயல்பட்டால், அது ஒரு குறிப்பிட்ட படிக அணித்தளத்தில் உள்ள அணு அல்லது மூலக்கூறின் பல தற்சுழற்சிக் கூறுகளை வெவ்வேறு திசைகளில் இருக்கச் செய்வதால், ஒரு விதமான தற்சுழற்சி சமனின்மை விளைகின்றது.

இவ்விளக்கங்களிலிருந்து பெரிகாந்தம் என்பது எதிர்பெரோ காந்தம் போன்றதே என்றும், ஆனால் அடுத்தடுத்துள்ள படிக அணித்தளங்களின் தற்சுழற்சிகள் ஒன்றையொன்று முழுதுமாக அழித்துக் கொள்வதில்லை என்றும், சுழியாக்கப்படாத இந்த நிகரத் தற்சுழற்சியால் ஒரு காந்தவாக்கம் ஏற்படுகின்றது என்றும் தெரிந்து கொள்ளலாம்.

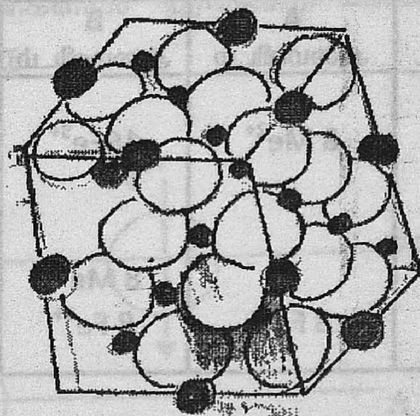
பெரிகாந்தப் பொருட்களும் பெரைட்டுகளின் வடிவமைப்பும்

வேதியியல் முறையில் பெரைட்டை $Me^{2}+ Fe_{2}^{3}+ O_{4}^{2}-$ எனக் குறிப்பிடலாம். இதில் Me^{2+} என்பது ஈரிணை திறன் கொண்ட அயனியாகும். இதில் $Mg^{2}+$, $Mn^{2}+$, $Fe^{2}+$, $Co^{2}+$, $Ni^{2}+$, Zn^{2+}, Cd^{2+} போன்ற உலோக அயனிகளை இதற்குக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம். Me^{2+} என்பது Ni^{2+} ஆனால் அதை நிக்கல் பெரைட் என்றும், Fe^{2+} ஆனால் பெரஸ் பெரைட் என்றும் கூறுவர். இயற்கையில் கிடைக்கின்ற இரும்புத் தாதுக்களில் ஒன்றான மாக்னெடைட், பெரஸ் பெரைட்டாகும். இதை Fe_3O_4 என்று வேதிக்குறியீட்டால் குறிப்பிடுவர்.

படிகத்தில் ஈரிணைத்திறன் கொண்ட உலோக அயனிகளுக்குச் சமமாக, அத்தன்மையை ஒன்றுக்கு மேற்பட்ட ஈரிணைதிறன் கொண்ட நேர்மின் அயனிகளால் பகிர்ந்து கொள்ளப்படும் நிலையும் காணப்படுகின்றது. இவ்வகைப் பெரிகாந்தப் பொருட்களைக் கலப்பினப் பெரைட்டுகள் (Mixed ferrites) என்பர். இதைப் பெரோ கனச்சதுரம் (ferro Cube) என்றும் குறிப்பிடுவர். Zn - Mn பெரைட், Zn-Ni பெரைட் போன்றவை இவ்வகையினதாகும்.

எக்ஸ்கதிர் - படிக ஆய்வு முறைகள் பெரைட்டுகளின் படிகக் கட்டமைப்பைத் தெளிவாகப் புலப்படுத்தியுள்ளன. 1.32°A ஆரமுடைய ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் முகமையம் கொண்ட கனச்சதுர வடிவமைப்பில் மிக நெருக்கமாகத் திணிக்கப்பட்டு உள்ளன. ஆக்ஸிஜன் அயனிகளுக்கிடையேயான சிற்றிடைவெளியில், அளவில் சிறிய ஈரிணைதிறன் மற்றும் மூவிணைதிறன் கொண்ட அயனிகள் இடம்பெற்று, இறுக்கமாகப் பிணைக்கப்பட்ட கட்டமைப்பைப்

பெரைட்டுகள் கொண்டுள்ளன. இக்கட்டமைப்பு இயற்கையில் கிடைக்கும் $MgAl_2O_4$ என்ற குறியீட்டால் குறிக்கப்படும் ஸ்பைனல் (Spinel) என்ற சிவப்பு நிற இரத்தினக் கல்லின் கட்டமைப்பை ஒத்திருக்கின்றது.



- O^2 அயனி
- Ng^{2+} அயனி
- Ae^{2+} அயனி

படம் 3.44 ஸ்பைனலின் படிகக்கட்டமைப்பு
(பெரைட்டின் கட்டமைப்பும் இத்தகையதே)

கட்டமைப்புகளை நுணுகி ஆராயும் போது, அதில் இரு சிற்றிடை வெளிகள் அல்லது பொந்துகள் இருப்பது தெரியவந்தது. ஒரு சிற்றிடை வெளியில் உள்ள அமைவிடம் நான்கு ஆக்ஸிஜன் அணுக்களால் சூழப்பட்டுள்ளது. மற்றொரு சிற்றிடை வெளியில் உள்ள அமைவிடம் ஆறு ஆக்ஸிஜன் அணுக்களால் சூழப்பட்டுள்ளன. இச்சிற்றிடை வெளி அமைவிடங்களை முறையே A என்றும் B என்றும் குறிப்பிட்டால், ஒரு படிக மூலஅலகில் 64, A அமைவிடங்களும், 32, B அமைவிடங்களும் இருக்கும் எனலாம். ஒரு படிக மூல அலகில் 32 ஆக்ஸிஜன் அயனிகள் உள்ளன. படிக மூல அலகில் 24 சிற்றிடைவெளி அமைவிடங்களே இடங்கொள்கின்றன. 16,B அமைவிடங்களிலும், 8, A அமைவிடங்களிலுமாக இவை அமைந்திருக்கின்றன. இதன்படி பெரைட்டின் கட்டமைப்பை அணுகினால், ஒரு படிக மூல அலகில் 32 ஆக்ஸிஜன் அயனிகளுடன் $16Fe^{3+}$ அயனிகளும் 8, Me^{++} அயனிகளும் அதிலிருக்கும் என்று

முடிவு செய்யலாம். இந்த 24 நேர்மின் அயனிகள் 24 சிற்றிடை வெளி அமைவிடங்களில் கீழ்க்கண்டவாறு பகிர்வு பெற்றுள்ளன.

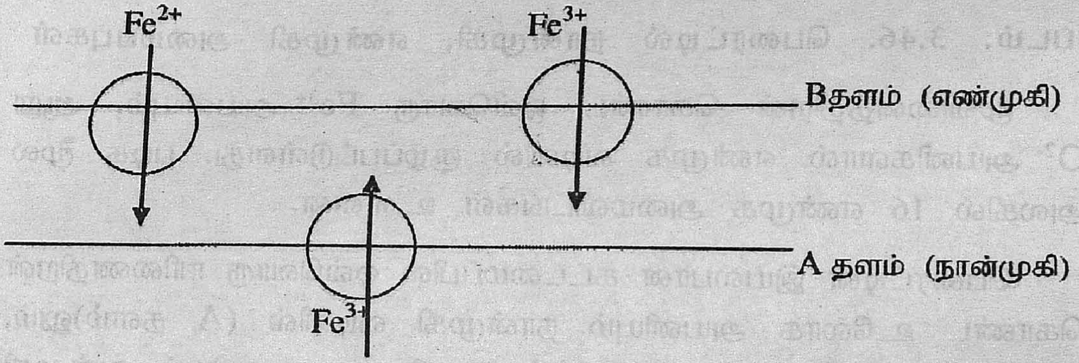
அட்டவணை 3.5. பெரைட்டின் அயனிகளின் அமைவிடங்கள்

கட்டமைப்பு	A அமைவிடம்	B அமைவிடம்	எடுத்துக்காட்டு	குறியீடு
சாதாரணவகைக் கட்டமைப்பு (Regular)	8 Me^{2+}	$16Fe^{3+}$	Cd, Zn பெரைட்டுகள்	Me^{2+} Fe^{3+} O_4
நேர்எதிர் முறையான கட்டமைப்பு (Inverse)	8 Fe^{3+}	8 Me^{2+} 8 Fe^{3+}	பெரஸ் பெரைட்டு	Fe^{2+} Fe^{3+} O_4

பெரைட்டுகளில் இவைகளுக்கிடைப்பட்ட அமைவு நிலைகளும் காணப்படுகின்றன. எனவே ஸ்பைனல் கட்டமைப்புடன் பல வகையான பெரைட்டுகள் இருக்கின்றன. இவற்றின் காந்தப் பண்புகளை அறிந்து கொள்வதற்கு, அதிலுள்ள அயனிகளின் பங்கீட்டுத்தனத்தையும், அமைவு நிலைகளையும், கட்டமைப்பையும் பற்றித் தெரிந்து கொள்ள வேண்டியது முக்கியமாகின்றது.

இதைப் பெரஸ் பெரைட்டைக் கொண்டு விளக்கிக் கொள்வோம். Fe_3O_4 என்பது Feo Fe_2O_4 ஆகும். இது அயனிகளாலானதால் இதன் தெவிட்டு நிலைக் காந்தப்பண்பை Fe^{2+}, Fe^{3+} அயனிகளிலுள்ள ஜோடியில்லாத எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையைக் கொண்டு மதிப்பிட முடியும். Fe^{2+} (பெரஸ்)ம், Fe^{3+} (பெரிக்)-ம் முறையே ஆறு மற்றும் ஐந்து 3d எலக்ட்ரான்களைக் கொண்டுள்ளன என்பதால், அவைகளில் முறையே 4, 5 ஜோடியில்லாத எலக்ட்ரான்கள் உள்ளன எனலாம். பெரிக் அயனிகள் மொத்தத் தற்சுழற்சி $s = 5/2$ ஆகவும், $L = 0$ ஆகவும் இருப்பதால் ஒவ்வொரு அயனியும் 5 B காந்தத்திருப்புத் திறனை வழங்கும். அதுபோல பெரஸ் அயனியின் மொத்தத் தற்சுழற்சி $S = 0$ என்பதால் அது $4\mu B$ என்ற காந்தத்திருப்புதிறனை அளிக்கும். Fe_3O_4-ல் உள்ள அயனிகள் யாவும் இணையாக இருக்குமெனில் அதன் தொகுபயன் காந்தத்திருப்புத் திறன் $4 + 2 \times 5 = 14\mu B$ ஆக இருக்கும். ஆனால் இப்பொருளுக்குச் சோதனை மூலம் கண்டறிந்த மதிப்பு $4.08\mu B$ ஆகும். இந்த முரண்பாட்டை அடுத்தடுத்துள்ள

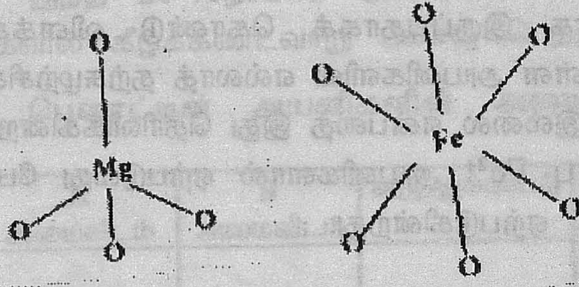
படிகத்தளத்திலிருக்கும் Fe^{3+} அயனிகள் ஒன்றுக்கொன்று எதிரிணையாக இருப்பதாகக் கொண்டு விளக்கலாம். அதாவது Fe_3O_4-ல் உள்ள அயனிகளின் எல்லாத் தற்சுழற்சிகளும் ஒரே மாதிரி இணையாக இல்லை என்பதை இது தெரிவிக்கின்றது. மேலும் இதன் காந்தப் பண்பு Fe^{2+} அயனிகளால் ஏற்படுவது போன்ற ஒரு மாயத் தோற்றத்தை ஏற்படுகின்றது.



படம். 3.45 மாக்னெடைட்டில் பெரஸ் மற்றும் பெரிக் அயனிகளின் அமைவு நிலை.

இதனால் நீல் என்பார் பாதியளவு Fe^{3+} அயனிகள் ஒரு படிகத்தளத்தில் ஒரு திசை நோக்கியும், மீதிப் பாதியளவு Fe^{3+} அயனிகளும் Fe^{2+} அயனிகளும் மற்றொரு படிகத்தளத்தில் எதிர்திசை நோக்கியும் இருக்குமாறு தற்சுழற்சிகளைப் பெற்றிருக்கின்றது என முடிவு செய்தார். இதனால் Fe^{3+} அயனிகளின் காந்தத்திருப்புத் திறன் சமப்படுத்தப்பட்டு அவற்றின் பங்களிப்பு சுழியாக்கப்படுவதால் பெரஸ் பெரைட்டின் காந்தத் திருப்புத்திறன் Fe^{2+} அயனிகளால் மட்டும் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. இது கொள்கைக்கும், சோதனை முடிவுகளுக்கும் இருக்கும் ஒற்றுமையைத் தெரிவிக்கின்றது. இதுபோன்ற விளக்கத்தைப் பிற பெரைட்டுகளுக்கும் கொடுக்கலாம்.

பெரைட்டின் சாதாரண அல்லது இயல்பான கட்டமைப்பில் ஒவ்வொரு உலோக அயனியும் நான்கு O^{2-} அயனிகளால் நான்முகி வடிவில் சூழப்பட்டுள்ளது. படிக மூல அலகில் இதுபோல எட்டு நான்முகி அமைவிடம் இருக்கின்றது.



படம். 3.46. பெரைட்டில் நான்முகி, எண்முகி அமைப்புகள்

மூவினைத்திறன் கொண்ட ஒவ்வொரு Fe^{3+} அயனியும், ஆறு O^{2-} அயனிகளால் எண்முக வடிவில் சூழப்பட்டுள்ளது. படிக மூல அலகில் 16 எண்முக அமைவிடங்கள் உள்ளன.

பெரைட்டின் இயல்பான கட்டமைப்பில் ஒவ்வொரு ஈரிணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனியும் நான்முகி வடிவில் (A தளம்)லும், ஒவ்வொரு மூவிணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனியும் எண்முகி வடிவிலும் (B தளம்) தோன்றியிருக்கின்றன. பெரைட்டின் நேர் எதிர் முறையான (Inverse) கட்டமைப்பில் ஒரு பாதி மூவிணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனிகள் A தளத்திலும் (நான்முகி), மீதிப் பாதி மூவிணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனிகளும், ஈரிணை திறன் கொண்ட உலோக அயனிகளும் B தளத்திலும் (எண்முகி) உள்ளன.

A தளத்தில் தற்சுழற்சிகள், B தளத் தற்சுழற்சிகளுக்கு எதிரிணையாக இருக்கின்றது என்ற கருத்தால் நீல் என்பார் பெரைட்டுகளின், பெரிகாந்தத் தன்மையை விளக்கினார். தளங்களுக்கிடையே எதிர் இடைவினை ஏற்படுவதால் இது தோன்றுவதாக அவர் கருதினார். AB வகை இடைவினையுடன், AA வகை மற்றும் BB வகை இடைவினைகளையும் அவர் கணக்கில் எடுத்துக் கொண்டார். இந்த இடைவினைகளும் கூட எதிர் இடைவினைகளே என்றாலும் AB வகை இடைவினையைவிட வலுவில் குறைந்தவை. AB வகை இடைவினையின் தாக்கம், A வகைத் தற்சுழற்சிகளை ஒரே திசையிலும், B வகைத் தற்சுழற்சிகளை எதிர்திசையிலும் ஒருமுனைப்படுத்துவதாக உள்ளது. AA வகை இடைவினை A வகைத் தற்சுழற்சிகளின் முனைவாக்கத்தையும், BB

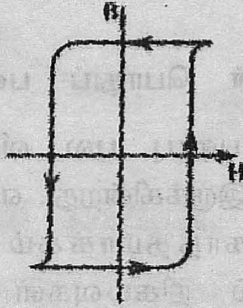
வகை இடைவினை B வகைத் தற்சுழற்சிகளின் முனைவாக்கத்தையும் சீர்குலைக்கின்றன. ஆனால் AB வகை இடைவினை, AA மற்றும் BB வகை இடைவினைகளை விட வலுவாக இருப்பதால் AB வகை இடைவினையின் மேன்மையால், எதிரிணையான தற்சுழற்சிகளின் அமைப்பு விளைகின்றது.

பெரைட்டின் பொதுப் பண்புகள்

பெரைட்டின் காந்தப் பண்பு பல விதங்களில் ஏறக்குறைய பெரோகாந்தப் பண்பு போல இருக்கின்றது. எடுத்துக்காட்டாக தயக்கக் கண்ணி, தூண்டலற்ற காந்தமாக்கம் மற்றும் இவற்றோடு தொடர்புடைய இயற்பியல் நிகழ்வுகள் எல்லாம் பெரைட்டும் புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றன. பெரைட்டின் குறிப்பிடத்தக்க காந்தப் பண்புகள், மிக அதிகமான காந்த உட்புகுதிறன், மிகக் குறைந்த காந்தநீக்கு விசை (Coersive foce), உயரளவு தெவிட்டுக் காந்தமாக்கச் செறிவு, 10^3 ஓம்/மீ என்ற நெடுக்கையில் உயரளவு மின்தடை போன்றவைகளாகும்.

பெரைட்டின் மிகக் குறைந்த மின்கடத்துதிறன், (எலக்ட்ரானிக்ஸ்) மின்னணுவியல் துறையில் உயர் அதிர்வெண், மிகை அதிர்வெண் பயன்பாடுகளில் அனுகூலமிக்கதாக இருக்கின்றது. குறைந்த அளவு மின்தடையெண் கொண்ட பெரோ காந்தப் பொருட்களை, அவை ஏற்படுத்தும் உயரளவு சுழலியக்க மின்னோட்டம் (eddy current) காரணமாக ஏற்படும் இழப்பினால், இவ்வுயர் அதிர்வெண் பயன்பாடுகளில் பயன்படுத்திக் கொள்ள முடியாது. பெரைட்டுகள் தாழ்ந்த தயக்கக் கண்ணி இழப்பையும், தாழ்ந்த சுழலியக்க மின்னோட்ட இழப்பையும் கொண்டுள்ளன. இதன் தயக்கக் கண்ணி சற்றேறக்குறைய ஒரு சதுர வடிவில் உள்ளது என்பதால் காந்த நீக்கு திறன் குறைவாக உள்ளது. உயரளவு காந்த நீக்கு விசை கொண்ட பெரைட்டுகளை கண்டுபிடித்துள்ளனர். இது மின் காந்தங்களுக்கு இணையான நிலைக் காந்தங்களை உருவாக்கப் பயன்படுகின்றது. ஏறக்குறைய செவ்வக வடிவில் தயக்கக்கண்ணி வரைபடத்தைக் கொண்டுள்ள பெரைட்டுகள், கணினியில் சேமிப்பகங்களாகப் (storage) பயன்படுகின்றன. மின்மாற்றிகளின் உள்ளகங்களிலும். தொலைக்காட்சிப் பெட்டியில் உள்ள வரிக் கண்ணோட்டச் சுருளிலும், உயர்வேக மின் சாவிகளிலும் பெரைட்டுகள் பயன்படுகின்றன. காந்தப் பரிமாண மாற்ற முறை மூலம் கேளா

ஒலி (ultrasonic) உற்பத்தி செய்யவும், வானொலிப் பெட்டிகளின் ஒலிவாங்கியின் உணர்திறனை அதிகரிக்கவும், நுண்ணலைச் சாதனங்களிலும் பயன்படுத்தப்படுகின்றது.



படம் 3.47 பெரைட்டின் தயக்ககண்ணி

பெரி காந்தத்திற்கான மூலக்கூறு புலக் கொள்கை

$Fe_x^{2+} Me_{1-x}^{2+} [Fe_{2-x}^{3+} Me_x^{2+}] O_4$ என்று பொதுவாகக் குறிப்பிடப்படுகின்ற எளிய பெரைட்டுகளைக் கருத்திற்கொண்டு பெரிகாந்தத்திற்கான மூலக்கூறு கொள்கையை வரையறுப்போம். இதில் Me^{2+} அயனிகள் டயா காந்தப் பண்புடன் உள்ளன. பகர அடைப்பிற்குள் உள்ள அயனிகள் எண்முகி வடிவில், அதாவது B வகை அமைவிடங்களில் இடம்பெறுகின்றன.

மூலக்கூறுப் புலக் கொள்கையைச் செயல்படுத்துவதற்குப் பெரைட்டுடின் அணு ஒன்றின் மீது செயல்படும் அகப்புலத்திற்கான ஒரு தொடர்பைப் பெறுவோம். AB வகை இடைவினை எதிர்குறித் தன்மையுடையதாக இருக்கின்றது என்று அனுமானிப்போம். AA வகை மற்றும் AB வகை மற்றும் BB வகை இடைவினையோடு ஒப்பீட்டு முறையில் குறிப்பிடும் சிறப்புக் கூறுகள் முறையே $-\alpha$, $-\beta$ என்போம்.

α = -AA அயனிகளுக்கிடையேயான இடைவினை / AB அயனிகளுக்கிடையேயான இடைவினை

β = -BB அயனிகளுக்கிடையேயான இடைவினை / AB அயனிகளுக்கிடையேயான இடைவினை

AB வகை இடைவினையின் எதிர் குறித் தன்மையால் α, β-ன் மதிப்பு நேரெண் மதிப்புகளாக இருக்கும். α எதிர்ரெண்

மதிப்புடையதாக இருப்பின் அது யுயு வகை இடைவினை எதிர்பெரோ காந்தத்தன்மையது என்பதைக் குறிப்பிடும்.

I_A, I_B என்பன முறையே A வகை அமைவிடத் தளத்திலும், B வகை அமைவிடத் தளத்திலும் மோலார் காந்தமாக்கச் செறிவு என்போம். A அமைவிடத்திலுள்ள அயனி ஒன்றின் மீது செயல்படும் மூலக்கூறுப் புலம் B_a என்போம்.

$$B_a = B - \lambda\,[\,(2\text{-}x)\,I_b - \alpha\, x\, I_a]$$

இதில் λ என்பது வெயிஸ் மாறிலியாகும், B - புறகாந்தப் புலத்தின் பாயச் செறிவு, $-\lambda\,(2\text{-}x)I_b$, AB இடைவினையாலான அகப்புலத்தையும், $\lambda\, x\, I_a$, AA இடைவினையாலான அகப்புலத்தையும் குறிப்பிடுகின்றது. இதைப்போல B அமைவிடத்திலுள்ள அயனி ஒன்றின் மீது செயல்படும் மூலக்கூறுப் புலம் B_b என்போம்.

$$B_b = B - \lambda\,[x I_a - \beta\,(2\text{-}x)\,I_b]$$

இரு வெப்பநிலை நெடுக்கையைக் கருத்திற்கொண்டு இச்சமன்பாடுகளை அணுகலாம்.

நிலை (i) $T > \theta$

நீல் வெப்பநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில், படிக அணித்தளங்கள் தனித்தனியாக் கியூரி - வெயிஸ் விதிக்கு உட்படுகின்றன.

$$I_a = C_a H_a / T \;;\; I_b = C_b\, H_b / T$$

பொதுவாக படிக அணித்தளங்களில் வெவ்வேறு எண்ணிக்கையில் பாராகாந்த அயனிகள் இடம் பெற்றிருப்பதால், ஒவ்வொரு வகைப் படிக அணித்தளத்திற்கும் வெவ்வேறு கியூரி மாறிலியைப் பயன்படுத்தவேண்டும்.

இதில் $C_a = \mu_o N M_a^2 / 3k_B : C_b = \mu_o N M_b^2 / 3k_B$

B_a, B_b-ன் மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்ய

$$I_a = C_a / \mu_o T [B-\lambda (2-x) I_b - \alpha x Ia)]$$

$$I_b = C_b / \mu_o T [B-\lambda(xI_a - \beta(2-x) I_b)]$$

மொத்த காந்த மாக்கச் செறிவு இவற்றின் பங்களிப்பின் கூடுதலாகும்.

$$I = x I_a + (2-x) I_b$$

பெரிகாந்தத்தின் பாராகாந்தப் பண்பிற்கு

$$H / I = 1 / x_{\text{மோலார்}} = T / c + 1/\chi_o - \sigma / T - \theta \qquad (3.102)$$

இத்தொடர்பில்

$C_a = C_b = C$ என்றும்

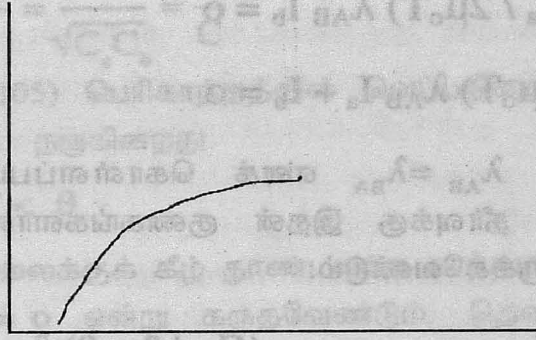
$1 / \chi_o = \lambda/4 [2x(2-x) - \alpha x^2 - \beta (2-x)^2]$ என்றும்

$\sigma = 1/16\lambda^2 c x (2-x) [x (1+x) - (2-x) (1+\beta)^2]$ என்றும்

$\theta = ¼ \lambda cx (2-x) (2+\alpha+\beta)$ என்றும்

கொள்ளப்பட்டுள்ளன.

ஒரு வகையான அயனி A வகை தளத்திலும், B வகை தளத்திலும் இருந்தால் மட்டும் $C_a = C_b$ என்பது சரியாகும். பெரஸ் பெரைட்டில் Fe^{3+} அயனிகள் இரு தளங்களிலும் சமஅளவில் இருப்பதால் $C_a = C_b$ என்று கொள்ளலாம். $1/x_{\text{மோலார்}}$-க்கும் T-க்கும் ஒரு வரைபடம் வரைந்தால், வரைகோடு வெப்பநிலை அச்சுநோக்கிக் குழிந்திருக்கின்றது.



படம் 3.48. பெரிகாந்தப் பண்பு, வெப்பநிலை வரைபடம்

வரைபடத்தைக் கொண்டு x_o, σ, θ - இவற்றின் மதிப்புகளைக் கண்டறிந்து கொள்ள முடியும். அவற்றைக் கொண்டு x, α, β, λ இவற்றின் மதிப்புகளையும் தெரிந்து கொள்ளமுடியும்.

பல பெரைட்டுகளுக்கு α, β இரண்டும் எதிர்குறியுடையனவாக இருக்கின்றன. அதாவது AA வகை, BB வகை இடைவினைகளும் கூட எதிர்பெரோ காந்தத் தன்மைபோல விளங்குகின்றன. மேலும் $[\alpha] << 1$; $[\beta] << 1]$. இது AB வகை இடைவினையின் வலுவான தஞ்மையைப் புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றது.

ஒரு சில அனுமானத்தின் அடிப்படையில் பெரிகாந்த ஏற்புத்திறனைத் தோராயமாக மதிப்பிடலாம். AA, BB இடைவினைகளைச் சுழியென்போம். எனவே அமைப்பில் AB வகை இடைவினை மட்டுமே செயல்படுகின்றது. இவ்வினையில் ஈடுபடும் அணுக்கள் இருதளங்களிலும் சரிபாதியாக இருப்பதால்

$$\left.\begin{aligned} I_a &= C_a / 2\mu_o T\,[B-\lambda_{AB} I_b] \\ I_b &= C_b / 2\mu_o T\,[B - \lambda_{BA}\, I_a] \end{aligned}\right\} \qquad (3.103)$$

$T = \theta$ என்ற நிலையில் பெரிகாந்தத்தின் தூண்டலற்ற காந்தத்தன்மை தோன்றியிருப்பதற்கான இறுதி நிலையாகும். எனவே $B = O$ எனில்

$$I_a + (C_a / 2\mu_o T)\lambda_{AB} I_b = o$$

$$(C_b / 2\mu_o T)\lambda_{AB} I_a + I_b = o$$

இங்கு $\lambda_{AB} = \lambda_{BA}$ எனக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. I_a, I_b -ன் சுழியில்லாத தீர்வுக்கு இதன் குணகங்களாலான அணிக்கோவை சுழியாக் இருக்கவேண்டும்.

$$\begin{vmatrix} 1 & (Ca / 2\mu_o\theta)\lambda_{AB} \\ (C_b / 2\mu_o\theta)\lambda_{AB} & 1 \end{vmatrix} = 0$$

இதிலிருந்து $\theta = \dfrac{\lambda_{AB}}{2\mu_o \sqrt{C_a C_b}}$

என்ற தொடர்பையும், $T > \theta$ என்ற வெப்பநிலையில் மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனையும் பெறலாம்.

$$\chi = (I_a + I_b) / H$$

I_a, I_b-ன் மதிப்புகளைப் பதிலீடு செய்து

$$\chi = [(B/2\mu_o T)(C_a + C_b) - (\lambda_{AB}/2\mu_o T)(C_a I_b + C_b I_a)]/H$$

சமன்பாடு (3.103) லிருந்து

$$C_a I_b + C_b I_a = C_a C_b / \mu_o T [B - \lambda_{AB} / 2 (I_a + I_b)]$$

இம்மதிப்பை மோலார் சாந்த ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்பில் பதிலீடு செய்து, திருத்தி அமைக்க,

$$\chi = [½ (C_a + C_b) T - \lambda_{AB} / 2\mu_o C_a C_b] / T^2 - \theta^2 \qquad (3.104)$$

மாக்னடைட்டில், காந்தத்தன்மை கொண்ட அயனிக்கள் Fe^{3+} மட்டுமே என்பதால்

$$C_a = C_b = C$$

$$\chi = CT - \theta C / T^2 - \theta^2 = C / T + \theta \qquad (3.105)$$

இதில் $\frac{\lambda_{AB}}{2} = \frac{\theta}{\sqrt{C_a C_b}} = \frac{\theta}{C}$

தொடர்பு (3.105) பெரிகாந்தத்தின் வெப்பநிலை சார்ந்த காந்த ஏற்புத் திறனைத் தருகின்றது.

நிலை (ii) $T < \theta$

நீல் வெப்பநிலைக்குக் கீழ் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கச் செறிவைப் பெறுவதற்கு $H = o$ என்று கருதவேண்டும். தெவிட்டு விளைவில் கியூரி - வெயிஸ் விதிக்குப் பங்கில்லை என்பதால் படிக அணித்தளங்களைத் தனித் தனியாகக் கருதலாம்.

$$I_a = NgS\,\mu_B\,B\,(x_a)\ ;\ x_a = gS\,\mu_B\,B_a / k_B T$$

$$I_b = NgS\,\mu_B\,B\,(x_b)\ ;\ x_b = gS\,\mu_B\,B_b / k_B T$$

இதில் N, அவகாட்ரோ எண்ணாகும், $B(x_a)$, $B(x_b)$ பிரிலோயின் சார்புகளாகும். பெரஸ் பெரைட்டிற்குத் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கச் செறிவு $I = (2-x)\,I_b - x\,I_a$ ஆகும். இதன் மதிப்பு x-ன் மதிப்பைச் சார்ந்திருக்கின்றது. பல பெரி காந்தப் பொருட்களின் காந்தமாக்கச் செறிவைக் கண்டறிந்து இதை உறுதி செய்திருக்கின்றார்கள்.

இரும்புக் கனிமம்
(Iron garnets)

$Me_3Fe_so_{12}$ என்று குறிப்பிடப்படுகின்ற செந்நிற இரும்புக்கனிமம் ஒரு வகையான பெரிகாந்தப் பொருளாகும். இதில் Me மூவிணைதிறன் கொண்ட உலோக அயனியாகும். Me^{3+} பொதுவாக யெட்ரியம் அல்லது 4க இடைநிலைத் தனிமங்களாக இருக்கின்றது. $Y_3Fe_5O_{12}$ என்ற பொருளை YIG என்று சுருக்குப் பெயரால் குறிப்பிடுவார்கள். இதன் படிகக்கட்டமைப்பு கனச்சதுர வகையாக இருந்தாலும், அதன் படிக மூல அலகு சிக்கலானதாக இருக்கின்றது. யெட்ரியம் இரும்புக் கனிமத்தில் Y^{3+} அயனி நிறைவு பெற்ற எலக்ட்ரான் கூட்டைப் பெற்றிருப்பதால், அது பாராகாந்தத் தன்மையுடையதாக இருப்பதில்லை. எனவே இப்பொருளின் காந்தமாக்கச் செறிவு Fe^{3+} அயனிகளால் மட்டுமே தோற்றுவிக்கப்படுகின்றது.

எக்ஸ்கதிர் - படிக ஆய்வுமுறைகள் இந்த இரும்பு அயனிகள் படிக மூல அலகில் இருவகையான அமைவிடங்களில் இருப்பதைக் தெரிவித்துள்ளன. Fe^{3+} அயனிகள் ஆறு ஆக்ஸிஜன் அணுக்களால் சூழப்பட்ட A தளத்திலோ, நான்கு ஆக்ஸிஜன் அணுக்களால் சூழப்பட்ட B தளத்திலோ இருக்கலாம். இதில் A தளத்திலுள்ள இரு அயனிகளின் காந்தத்திருப்புத்திறன், B தளத்திலுள்ள மூன்று அயனிகளின் காந்தத் திருப்புத்திறனுக்கு நேர் எதிராக இருக்கின்றது என்பதை அறிந்துள்ளார்கள். எனவே $Y_3Fe_5O_{12}$ படிக மூல அலகொன்றுக்கான காந்தத் திருப்பு திறனேயாகும். இதன் மதிப்பு 5 μB. இது சோதனை மதிப்பான 4.96 μB - உடன் ஒன்றியிருக்கின்றது.

செந்நிற இரும்புக் கனிமம், பெரைட்டுகளைவிட அனுகூலமாயிருக்கின்றது. ஏனெனில் இப்பொருட்களில் தயக்கக் கண்ணி இழப்பு குறிப்பிடும் படியாகக் குறைவாக இருக்கின்றது.

கணக்கு. 1

ஹைட்ரஜன் அணுவின் 1s என்ற எலக்ட்ரானின் அலைச்சார்பு

$\psi = (\pi a_o^3)^{-1/2} e^{-r/ao}$. இதில் $a_o = h^2 / me^2 = 0.529 \times 10^{-10}$ மீ.

ஹைட்ரஜன் அணுவின் மோலார் டயா காந்த ஏற்புத் திறனைக் கணக்கிடுக.

$$<r^2> = \int_0^\infty r^2 1\psi 12 \, d\tau = \int_0^\infty r^2 [\psi]^2 4\pi r^2 dr$$

Ψ-ன் மதிப்பை பதிலீடு செய்ய

$$<r^2> = 4/a_o^3 \int_0^\infty r^4 e^{-2r/ao} dr$$

படித்தரத் தொகுப்பாக்கத்தின்படி

$$\int_0^\infty x^n e^{-an} dx = n! / a^{n+1}$$

எனவே

$<r^2> = 3a_o^2$

$X_{டயா} = -N\mu_o e^2/6m \sum r_i^2 = -N\mu_o e^2 / 2m\ a_o^2$

$= - 6.023 \times 10^{26} \times 4\pi \times 10^{-7} \times (1.602)^2 \times 10^{-38} \times (0.529)^2 \times 10^{-20} / 2 \times 9.109 \times 10^{-31}$

$= 0.0298 \times 10^{-6}$ மீ^{3} / மோல்

கணக்கு.2

1 மோல் செறிவுள்ள பாரா காந்த வளிமத்தின் காந்தத் திருப்புத்திறன் 100 காஸ் பாயச் செறிவுள்ள வலிமை குறைந்த காந்தப்புலத்தில், சார்பிலா வெப்பநிலை 300K-ல் 1.5×10^{-8} ஜுல் / காஸ் மோல். ஒரு மூலக்கூறின் காந்தத் திருப்புதிறனையும், கியூரி மாறிலியின் மதிப்பையும் கணக்கிட்டறிக.

லாஞ்செவின் கொள்கைப்படி $I = NM^2_{அணு} B/3k_BT = 1.5 \times 10^{-8}$

$M_{அணு} = \sqrt{1.5 \times 10^{-8} \times 3 \times 8.31 \times 300 / (6.023 \times 10^{23})^2 \times 100}$

$= 1.7587 \times 10^{-27}$ ஜீல் / காஸ்

போர் மாக்னெட்டான் அலகில்

$\mu B = 9.27 \times 10^{-28}$ ஜீல்/காஸ்

எனவே $M_{அணு} = 1.7587 \times 10^{-27} / 9.27 \times 10^{-28} = 1.896\ \mu B$

கியூரி மாறிலி $C = \mu o (N M_{அணு})^2 / 3R$

$\pi = 4 \times 10^{-7} \times (6.023 \times 10^{23})^2 \times (1.896\ \mu B)^2 / 3 \times 8.31$

கணக்கு. 3

Dy^{3+} அயனியின் புற எலக்ட்ரான் கட்டமைப்பு $4f^9 6s^o$. ஒரு கிலோ மோல் Dy^{3+} அயனிகள் அடங்கிய ஓர் உப்பின் காந்த ஏற்புத்திறனை 300K வெப்பநிலையில் மதிப்பிடுக

Dy^{3+}-ல் உள்ள ஜோடியில்லாத எலக்ட்ரான்கள் 5 ஹண்டு விதிப்படி

$S = 5 (1/2) = 5/2$

$L = 3 + 2 + 1 + 0 - 1 = 5$

$J = L + s = 5/2 + 5 = 15/2$

எனவே $g = 1 + J (J+1) + s (s + 1) L (l+1) / 2J (J +1) = 1.33$

$x = \mu_o N\mu B^2 / 3k_B T g^2 J (J +1)$

$= 4\pi \times 10^{-7} \times 6.023 \times 10^{26} \times (9.27 \times 10^{-24})^2 \times (1.33)^2 / 3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \; [15/2 (17/2)]$

$= 5.9 \times 10^{-4}$ SI அலகுகள்

கணக்கு 4

நிக்கலுக்குத் தெவிட்டுக் காந்தப்பாயச் செறிவு 0.65 வீபர்/மீ2. நிக்கலின் அடர்த்தி 8906 கி.கி/மீ3, அணு எடை 58.7 எனில் ஒரு நிக்கல் அணுவின் காந்தத்திருப்புத் திறனை போர்மாக்னெட்டான் அலகில் கணக்கிடுக.

தெவிட்டுக் காந்தப் பாயச் செறிவு $B_s = \mu_o NM_{அணு}$ N என்பது ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள நிக்கல் அணுக்களின் எண்ணிக்கை.

ஓரலகுப்பருமன் = 8906 கி.கி நிறை கொண்ட நிக்கல் இதிலுள்ள நிக்கல் அணுக்களின் எண்ணிக்கை $8.906 \times 6.023 \times 10^{26} / 58.7$

$N = 9.14 \times 1028$ அணு / $மீ^3$

எனவே $M_{அணு} = 0.65/ 9.14 \times 10^{28} \times 4 \pi \times 10^{-7}$

$= 5.66 \times 10^{-24}$ ஆம்பியர் - மீட்டர்^{2}

1 போர் மாக்னெட்டான் $\mu B = 9.27 \times 10^{-24}$ ஆ.மீ^{2} எனவே போர் மாக்னெட்டான் அலகில் நிக்கல் அணுவின் காந்தத் திருப்புத்திறன் $M_{அணு} = 5.66 \times 10^{-24} / 9.27 \times 10^{-24} = 0.61$ போர்மாக்னெட்டான்

வினாக்களும், கணக்குகளும்

1. ஒரு பொருளின் இருக்கும் காந்த மூலங்கள் யாவை? அவற்றின் தனித்தன்மைகளைப் பட்டியலிடு.

2. வரையறு: காந்தமாக்கச் செறிவு, காந்த ஏற்புத்திறன்

3. காந்தத்தன்மையை வகைப்படுத்தி அதன் தனித்தன்மைகளை ஒப்பிடுக.

4. 1 என்ற சுற்றியக்கக் கோண உந்தம் கொண்ட அணு எலக்ட்ரானின் காந்தத் திருப்புத் திறனுக்கான தொடர்பை நிறுவுக.

5. காந்த விசையினால் அணு எலக்ட்ரானின் வட்டப்பாதை இயக்கத்தில் என்ன மாற்றம் ஏற்படும்?

6. லார்மர் தற்சுழற்சி இயக்கத்தினால் அணு எலக்ட்ரானின் வட்டப்பாதையின் ஆரம் மாறாது என்றால், எது மாறும்? அந்த மாற்றத்தின் அளவுக்கான தொடர்பைத் தருக.

7. தொல்லியற்பியல் அடிப்படையில் லாஞ்செவின் டயா காந்தக் கொள்கையை விவரித்து, ஒரு மோலார் செறிவுள்ள பொருளின் டயா காந்த ஏற்புத் திறனுக்கான தொடர்பை நிறுவு.

8. ஒரு பொருளின் டயா காந்தப் பண்பிற்கான குவாண்டம் கொள்கையை விவரி.

9. உலோகங்கள் பாராகாந்தத் தன்மையுடையனவாக இருப்பதேன்?

10. டயாகாந்தத் தன்மைக்கும், பாரா காந்தத் தன்மைக்கும் உள்ள வேற்றுமைகள் யாவை?

11. பாராகாந்தத் தன்மை, வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத்திலிருப்பது ஏன்?

12. டயா காந்தத்திருப்புத்திறன், ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்புகளில் காணப்படும் எதிர்குறிக்கான முக்கியத்துவம் என்ன?

13. தொல்லியற்பியல் அடிப்படையில் லாஞ்செவின் பாராகாந்தக் கொள்கையை விவரித்து, வெவ்வேறு வெப்பநிலை நெடுக்கையில் அதன் மோலார் காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்பைப் பெற்று விளக்குக.

14. பாராகாந்தம் தொடர்பான லாஞ்செவின் கொள்கையின் எல்கையையும் அதன் இயலாமையையும் கூறுக.

15. தாழ்ந்த புலச்செறிவிலும், உயர் வெப்பநிலையிலும் ஒரு பொருளின் பாரா காந்த ஏற்புத்திறனுக்கான குவாண்டம் கொள்கை அடிப்படையிலான தொடர்பைப் பெறுக. இத்தொடர்பைக் கொண்டு இரும்பு மற்றும் அருமண் தொகுதி அயனிகளின் பாராகாந்தத் தன்மையை விளக்குக.

16. இடைநிலை மற்றும் அருமண் உலோகங்களில் எலக்ட்ரான்களின் வட்டப்பாதை இயக்கம் எங்ஙனம் தணிக்கை செய்யப்படுகின்றது?

17. பாராகாந்தம் தொடர்பான வெயிஸ் கொள்கையை விவரித்து கியூரிவெப்பநிலைக்கான தொடர்பைப் பெறுக.

18. குறுகிய ஆற்றல் பிரிநிலைகளில் அடங்கியுள்ள அணு எலக்ட்ரான்களின் மோலார் பாரா காந்த ஏற்புத்திறன்

$$\chi = \mu_o N^2 M_J^2 / 3RT$$

எனக்காட்டுக.

19. ஆற்றல் பிரிநிலைகளின் அகலம் $k_B T$ என்ற நெடுக்கையில் அல்லது இடைப்பட்டதாக இருக்கும் போது பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறன் பிரிலோயின் சார்புக்கு ஏற்ப

$$\chi_{\text{மோலார்}} = (\chi)_{\text{மோலார் - பெருமம்}} \; B_J(x)$$

என இருக்கின்றது என்று நிறுவுக.

20. ஹூண்டு விதியைக் கொண்டு அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையில் ஓர் அணுவின் மொத்தக் கோண உந்தத்தை எவ்வாறு மதிப்பிட்டறிவாய்? தக்க உதாரணங்களுடன் விளக்குக.

21. செயலுறு போர் மாக்னெட்டான் என்றால் என்ன? L-S பிணைப்புற்ற அருமண் தொகுதி அயனிகளுக்கான செயலுறு போர்மாக்னெட்டானை எங்ஙனம் மதிப்பிட்டறிவாய்?

22. பாராகாந்தக் குளிர்வூட்டல் முறையை விளக்கி, வெப்பநிலை வேறுபாட்டிற்கான ஒரு தொடர்பைப் பெறுக.

23. பௌலி பாராகாந்தம் என்றால் என்ன? இது இயல்பான பாராகாந்தத்திலிருந்து எங்ஙனம் வேறுபட்டிருக்கின்றது?

24. உலோகங்களின் பௌலி பாராகாந்தப் பண்பை விளக்கி, அதற்கானதொரு தொடர்பைப் பெறுக.

25. லாண்டு டயா காந்தம் என்றால் என்ன?

26. பெரோகாந்தத்திற்கான வெயிஸ் கொள்கைப் பற்றிக் கூறு. இக்கொள்கையின் அடிப்படையில் தயக்கக்கண்ணி மற்றும் கியூரி வெப்பநிலை இவற்றை நீ எங்ஙனம் விளக்குவாய்?

27. பெரோ காந்தத்திற்கான வெயிஸ் கொள்கையைக் கொண்டு வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாறுபடும் தெவிட்டு நிலைக்காந்தமாக்கத்தை எங்ஙனம் விவரிப்பாய்?

28. பெரோ காந்தத்திற்கான வெயிஸ் கொள்கையின் அடிப்படையில் தூண்டலற்ற காந்தமாக்கலுக்கான நிபந்தனையைப் பெறுக.

29. கியூரி வெப்பநிலைக்கும், வெயிஸ் வெப்பநிலைக்கும் உள்ள தொடர்பைப் பெறுக.

30. வெயிஸ் மாறிலியை எங்ஙனம் மதிப்பிட்டறிவாய்?

31. வெயிஸ் கொள்கையின் குறைபாடுகள் யாவை? இவை எங்ஙனம் ஹைசன்பெர்க் பெரோ காந்தக் கொள்கையில் நீக்கப்படுகின்றன?

32. ஹைசன்பெர்க்கின் பரிமாற்ற வினையை விளக்குக. இது எங்ஙனம் பெரோகாந்தத்தை விவரிக்கின்றது? பெரோ மற்றும் எதிர்பெரோ காந்தப்பொருளின் காந்த ஏற்புத்திறனின் இயல்புகளில் காணப்படும் வேறுபாடுகளை இதன்மூலம் புலப்படுத்திக் காட்டுக.

33. ஹைசன்பெர்க் பெரோ காந்தக்கொள்கை மூலம், பரிமாற்ற தொகுப்பிற்கும், வெயிஸ் மாறிலி மற்றும் பெரோ காந்த கியூரி வெப்பநிலைக்கும் இடையேயான தொடர்பைப் பெறுக.

34. மாக்னான் என்றால் என்ன? தற்சுழற்சி ஊடலையின் அதிர்வெண் k^2க்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது எனக் காட்டுக.

35. தற்சுழற்சி ஊடலையின் குவாண்டம் பண்புகள் யாவை?

36. ஒரு படிகத்தின் ஓரலகுப் பருமனில் இருக்கும் கிளர்ச்சியுற்ற

மாக்னான்களின் எண்ணிக்கைக்கான தொடர்பை நிறுவிப் ப்ளாக் விதியைப் பெறுக.

37. பெரோகாந்த வயல்கள் என்றால் என்ன? இதன்மூலம் யாது? ப்ளாக் வரப்பின் தடிப்பிற்கான ஒரு தொடர்பைப் பெறுக.

38. பெரோ காந்தவயல்களின் கட்டமைப்பை அறியும் பல்வேறு வழிமுறைகளை விவரி.

39. இரு துணை அணித்தளங்களின் அடிப்படையில் எளிய எதிர் பெரோ காந்தப் பொருளின் காந்தஏற்புத்திறனுக்கான தொடர்பை வருவி. துணை அணித்தள இடைவினை மூலம் நீல்வெப்பநிலை மற்றும் கியூரி வெப்பநிலைகளின் வேறுபாட்டை எப்படி விளக்குவாய்?

40. பெரோ, எதிர்பெரோ மற்றும் பெரி காந்தங்களுக்கிடையேயான வேற்றுமைகள் யாவை?

41. ஓர் எதிர் பெரோ காந்தப் பொருளின் நீல்வெப்பநிலை, கியூரி வெப்பநிலைக்கிடையேயான தொடர்பைப் பெறுக.

42. பெரிகாந்தத்திற்கான மூலக்கூறு புலக்கொள்கையை விவரி.

கணக்குகள்

1. ஓர் அணுவின் கோண உந்தம் $J = S = \frac{1}{2}$. மேக்ஸ்வெல் - போல்ட்ஸ்மென் புள்ளியியல் கொள்கையைக் கொண்டு அவ்வணுக்களாலான பாராகாந்த வளிமத்தின் காந்த ஏற்புத்திறனைக் கணக்கிடுக. உயர்வெப்பநிலை, தாழ்ந்த காந்தப்பாயச் செறிவு நிலையில் தீர்வு தொல்லியற்பியலால் நிறுவப்பட்ட முடிவிற்கு ஒத்திருக்கின்றது என்று காட்டுக.

2. Cr^{2+} அயனியின் புற எலக்ட்ரான் கட்டமைப்பு $3d^4\ fs^o$ ஆகும். Cr^{2+} அயனியின் ஒரு கிலோமோல் செறிவுடன் கூடிய உப்பின் காந்த ஏற்புத்திறனை 300K வெப்பநிலையில் கணக்கிடுக. (குறிப்பு Cr^{2+} ன் சுற்றுப்பாதை கோணஉந்தம் படிகப் புலத்தால் தணிக்கப்படுகின்றது)

(விடை: 1.25×10^{-4})

3. செம்பு சல்பேட்டின் பாராகாந்தம் s = ½ உடன் கூடிய செம்பு அயனியால் விளைகின்றது. இதன் காந்தமாக்கச் செறிவு

$$I = N\mu_B \tan k\,(\mu_B B / k_B T)$$

என்ற தொடர்பின்படி இருக்கின்றது எனக்காட்டுக.

4. இரும்பு 1043 K கியூரி வெப்பநிலையுடன் கூடிய ஒரு பெரோ காந்தம். இதன் ஓரணு 2.2 μB என்ற பயன்முனைப்பான திருப்பு திறனைக் கொண்டுள்ளது என்றால், அதன் அகப்புலச் செறிவை மதிப்பிடுக.

(விடை: 2100 டெஸ்லா)

5. ஈரோப்பியம் ஆக்ஸைடு 70K கியூரி வெப்பநிலை கொண்ட ஒரு பெரோ காந்தப்பொருள். ஒரு ஈரோப்பிய அயனி J = 7/2, g = 2 என்ற மதிப்பைப் பெற்றுள்ளது. அகப்புலத்தின் காந்தப்பாயச்செறிவைக் கணக்கிடுக. மேலும் 0.05 டெஸ்லா காந்தப்புலத்தில் 300K வெப்பநிலையில் காந்தமாக்கச் செறிவிற்கும் அதன் O K வெப்பநிலை மதிப்பிற்கும் உள்ள தகவைக் கண்டறி

விடை: 34.7 டெஸ்லா 4.38×10^{-4})

6. கடோலினியம் என்ற அருமண் தனிமம் 16°C வெப்பநிலைக்குக் கீழ் ஓரணுவிற்கு 7.1 போர்மாக்னெட்டான் என்ற காந்தத் திருப்புத்திறனுடன் பெரோ காந்தமாக இருக்கின்றது. ஒரு கிராம் நிறையுள்ள பொருளின் காந்தத் திருப்புத் திறனைக் கணக்கிடுக. கடோலினியத்தின் அணுநிறை 157.26 எனவும், அடர்த்தி 7.8 x 103 கி.கி/மீ3 எனவும் கொடுக்கப்பட்டிருந்தால், காந்தமாக்கச் செறிவின் தெவிட்டு மதிப்பைக் கண்டறிக.

விடை: $M = 1.9668 \times 10^3$ ஆமீ²

Bs = 2.4726 வீபர்/மீ²

7. T என்ற வெப்பநிலையில் 2 Wb/m² என்ற காந்தப்புலத்தில் வெறும் எலக்ட்ரான் தற்சுழற்சிகளாலான ஓர் அமைப்பு வைக்கப்பட்டுள்ளது. காந்தப் புலத்திற்கு இணையாக இருக்கும் தற்சுழற்சி எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை, அதற்கு எதிரான தற்சுழற்சி கொண்ட எலக்ட்ரான் களைப்போல இரு மடங்கு எனில், தொல்லியற்பியல் அடிப்படையில் T-ன் மதிப்பைக் கண்டுபிடி

(விடை: T = 39K)

4. மின் கடத்தாப் பொருள் பண்புகள்

மின்முனைவாக்கம் - மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி - மின் இடப்பெயர்ச்சி வெக்டர் - மின்னேற்புத்திறன் - மின்முனைவாக்க வகைகள் அதிர்வெண் சார்புடைமை.

மூலக்கூறுப்புலம் - கிளாசியல் மொசோட்டி சமன்பாடு - லாஞ்சவின் சமன்பாடு முனைவு மூலக்கூறுகளின் முனைவாக்கம் - மூலக்கூறின் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறன்-ஆற்றலிழப்பு மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி அதிர்வெண் சார்ந்த எலக்ட்ரான் முனைவாக்குத்திறன்

மின்கடத்தாப் பொருள் ஆற்றல் இழப்பு - மின் கடத்தாப் பண்பின் முறிவு - பெர்ரோ மின் பொருள்

4. மின்கடத்தாப் பொருள் பண்புகள் (Dielectrics)

4.1. அறிமுகம்

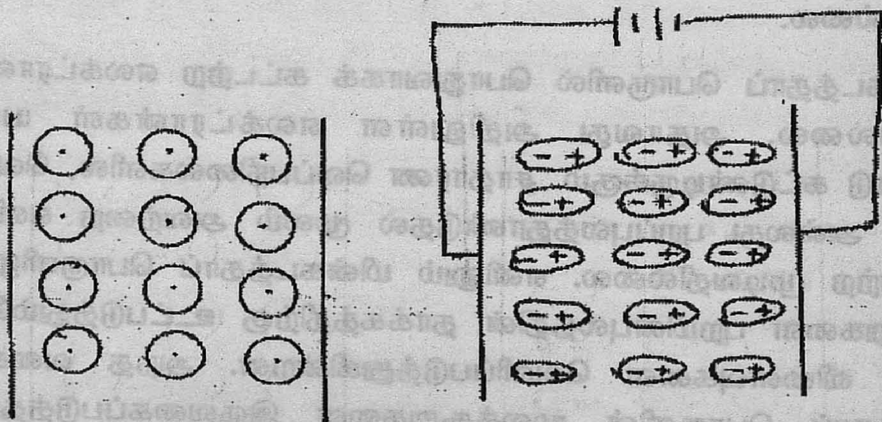
மின் கடத்தாப் பொருள் மின்சாரத்தைக் கடத்துவதில்லை. இதில் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் மற்றும் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டைகளுக்கிடைப்பட்ட, தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளி, மிகவும் அதிகமாக, 3 எலக்ட்ரான் வோல்ட் (>3ev) அலகில் இருப்பதால், கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் ஏதும் இருப்பதில்லை. குறைக்கடத்திகளைப்போல, மின்கடத்தாப் பொருளிலும் வேற்றுப்பொருளைக் கலந்தாலும், கொடுப்பான் அல்லது ஏற்பானின் ஆற்றல் நிலைகள், ஆற்றல் பட்டையின் விளிம்பிலிருந்து பெரிதும் விலகி இருப்பதால், அவைகளும் சரதாரண வெப்ப நிலைகளில் மின்கடத்தலுக்குப் பயன்தருவதில்லை.

படிகங்களில் மின் கடத்தல் அணுக்களின் ஊடுபரவல் மூலமாக, அதாவது படிகத்தளத்தின் ஊடாக் அயனிகளின் இயக்கத்தால் நிகழலாம். எனினும் கனமான அயனிகளின் நகர்திறன் மிகவும் குறைவு. ஆதனால் மின்கடத்தாப் பொருளுக்கு, குறைக்கடத்தியைப்போல ஹால் விளைவு குறிப்பிடும்படியாக இருப்பதில்லை.

மின்கடத்தாப் பொருளில் பொதுவாகக் கட்டற்ற எலக்ட்ரான்கள் இருப்பதில்லை. அதாவது அதிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் யாவும் அணுவோடு கட்டுண்டிருக்கும். சாதாரண வெப்பநிலைகளில், வெப்பக் கிளர்ச்சி அல்லது புறப்புலத்தூண்டுதல் மூலம் அவற்றை எளிதாக வெளியேற்ற முடிவதில்லை. எனினும் மின்கடத்தாப் பொருளிலுள்ள மூலக்கூறுகளை புறமின்புலத்தின் தாக்கத்திற்கு உட்படுத்தும்போது பல்வேறு விளைவுகளை வெளிப்படுத்துகின்றன. அந்த வகையில் மின்கடத்தாப் பொருளின் மூலக்கூறுகளை இருவகைப்படுத்தலாம். அவற்றை முனைவுறு மூலக்கூறு (Polar molecule) முனைவுறா மூலக்கூறு (Non-Polar molecule) என்றழைப்பர். இயல்பான ஒரு மூலக்கூறில், அணுக்கருக்களினாலான நேர் மின்னூட்டமும், எலக்ட்ரான்களினாலான எதிர்மின்னூட்டமும் சமமாக இருக்கும். அதாவது மூலக்கூறு மின் நடுநிலையிலிருக்கும். மூலக்கூறிலுள்ள

நேர்மின்னூட்டங்கள் எல்லாம் ஒரு புள்ளியில் செறிவுற்றிருப்பதாகக் கருதினால் அப்புள்ளி நேர்மின் அட்டங்களின் பொது மையமாகும். அதுபோல மூலக்கூறிலுள்ள எலக்ட்ரான்களுக்கும் ஒரு பொது மையமிருக்கும். இவ்விரு பொது மையங்களும் ஒன்றோடொன்று மேற்பொருந்தியிருந்தால், அது முனைவிலா மூலக்கூறாகும். காற்று, ஹைட்ரஜன் மூலக்கூறு H_2, பென்சீன், கார்பன் - டை - சல்பைடு, கார்பன் டெட்ரா குளோரைடு போன்றவை இவ்வகையினதாகும்.

நேர் மற்றும் எதிர் மின்னூட்டங்களின் பொது மையங்கள் மேற்பொருந்தி அமையாது, இயல்பாகவே சிறிய இடைவெளியுடன் விலகி இருக்குமானால், அம்மூலக்கூறுகளை முனைவு மூலக்கூறு என்பர். நீர், கண்ணாடி, குளோரோபாம் போன்றவை இவ்வகையினதாகும். இம்மூலக்கூறுகளில் நேர் மற்றும் எதிர் மின்னூட்டங்கள் சிறிய இடைவெளியுடன் விலகி இருப்பதால், அவை மின் இருமுனை (Electric dipole) போல் செயல்படுகின்றன. அதனால் மூலக்கூறுகள் புறமின்புலத்தில் மின் இருமுனைத்திருப்பு திறனைப் (dipole moment) பெறுகின்றன. இது முனைவிலா மூலக்கூறுகளில் தூண்டப்பட்டும், முனைவு மூலக்கூறுகளில் நிரந்தரமானதாகவும் இருக்கின்றது. அதாவது முனைவிலா மூலக்கூறுகளில் புறமின்புலம் இருக்கும் போது மட்டும், இருமுனைத் திருப்புத்திறனைப் பெற்றிருக்கும்.



மின்புலம் இல்லா நிலையில் — மின்புலம் செயல்படும் நிலையில்

படம் 4.1 மின்புலத்தில் மூலக்கூறுகளின் அணிவகுப்பு

மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறன் என்பது விலகி இருக்கும் மின்னூட்டத்திற்கும் |q|, அவைகளுக்கிடைப்பட்ட தொலைவிற்கும் உள்ள பெருக்கல் பலனாகும். மூலக்கூறுகளில் இப்படி விலகி அமையும் மின்னூட்டம் 10^{-19} கூலும் என்ற நெடுக்கையிலும், பயன் முனைப்பான இடைத்தொலைவு மூலக்கூறுகளோடு தொடர்புடைய பரிமாணமான 10^{-10} மீ அளவிலும் இருக்கும். எனவே மூலக்கூறுகளில் மின் இருமுனைத்திருப்புத்திறனின் நெடுக்கை

மின் இருமுனைத் திருப்புத் திறன் $= \mu =$ மின்னூட்டம் x இடைத்தொலைவு

$= 1 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-10}$

$\mu = 10^{-29}$ கூலும் - மீட்டர்

இந்த அளவை ஒரு டிபை (Debye) என்பர். ஒரு மூலக்கூறு பெற்றிருக்கும் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறனே, அது எந்த அளவிற்கு புற மின்புலத்தில் இடைவினைபுரியும் என்பதை மதிப்பிடுகின்றது. அதாவது இருமுனைத் திருப்புத்திறன் மிக்க மூலக்கூறுகள், மின் இருமுனையின் அச்சு புறமின்புலத்தில் புலத்திசையிலேயே அமையுமாறு தன்னைத் தானே விரைந்து திருப்பிக் கொள்கின்றன.

4.2 மின்கடத்தா மூலக்கூறுகளின் முனைவாக்கம் (Dielectric Polarisation)

நிலைமின்புலத்தில் வைக்கப்பட்ட மூலக்கூறுகளில், மின்துருவங்கள். தூண்டப்படுவதால், இடப்பெயர்ச்சியுற்று, புலத்திசையின் பக்கமாக ஒரு சேரத் திரும்புகின்றன. ஓரலகுப் பருமனில் தூண்டப்படும் மின் இருமுனைத்திறன் மின்முனைவாக்கம் (electric polarisation) எனப்படும். இதை P என்ற எழுத்தால் குறிப்பிடுவர். முனைவு மூலக்கூறுகளில் இது தூண்டப்படாமலேயே நிகழ்கின்றது. V என்ற பருமனில் உள்ள மூலக்கூறுகளின் மொத்த மின் இருமுனைத் திருப்புத் திறன் $\Sigma\mu$ எனில், முனைவாக்கம; $P = \Sigma\mu/\Sigma\mu/V$ ஆகும்.

எல்லா மூலக்கூறுகளும் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறனைப் பெற்றிருந்தாலும், அவை வெப்ப இயக்கத்தின் காரணமாக

முழுமையாகப் புலத்திசையிலே தன் அச்சு இருக்குமாறு அமைவதில்லை. வெப்ப இயக்கம் முனைவாக்க முயற்சிக்கு எதிரானது என்பதால் வெப்பச் சமநிலைக்கு ஏற்பப் புலதிசையில் மூலக்கூறுகள் ஒரு பகுதி முனைவாக்கத்திற்கே பங்களிப்புச் செய்யும். புலச்செறிவு அதிகரிக்க இந்தப் பங்களிப்பு அதிகரிப்பதால் தூண்டப்படும் மின் இருமுனைத்திருப்புத்திறன் புலச்செறிவிற்கு நேர் விகிதத் தொடர்பில் இருக்கின்றது எனலாம். இதை

$$\vec{\mu} = \alpha E$$

என்ற தொடர்பால் குறிப்பிடுவர். α என்பது விகித மாறிலியாகும். இதை முனைவாகு திறன் (Polarizability) என்பர். இது மின் கடத்தாப் பொருளில் உள்ள தனித்துகளின் மின்பண்புகளைத் தெரிவிக்கக்கூடியதாக இருக்கின்றது.

μ என்பது ஒரு மூலக்கூறு பெற்றிருக்கும் சராசரித் தூண்டல் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறன் (Dipole moment) என்றும், மின்கடத்தாப் பொருளில் ஓரலகுப் பருமனில் n மூலக்கூறுகள் இருக்கின்றன என்றும் கொண்டால், முனைவாக்கம்

$$P = n\mu = n\alpha E \tag{4.1}$$

முனைவாக்கத்தரம், மின்புலச் செறிவு மட்டுமின்றி மின்கடத்தாப் பொருளின் தன்மையையம் பொறுத்து. பெரும்பாலான பொருட்களுக்கு $E \rightarrow 0, P \rightarrow 0$ எனவே $P \alpha E$ $P = \varepsilon_o X_e E$; இதில் x_e என்பது மின்னேற்புத்திறன் எனப்படும். மின்கடத்தாப் பொருளின் பண்புகளை விரிவாக அறிந்து கொள்ள, அது தொடர்பாகச் சில அடிப்படைகளை வரையறுத்துக் கொள்ள வேண்டியது அவசியமாகும்.

(i) ஒப்பு மின் உட்புகுதிறன் (ε_r)

மின் உட்புகுதிறன் (Permittivity) ஊடகத்தைப் பொறுத்துப் பொருளுக்குப் பொருள் மாறுபடுகின்றது. எல்லாப் பொருட்களும் காற்று வெளியில் (ஏறக்குறைய வெற்றிடவெளி இதற்கு ஈடானது) இருப்பதால், வெற்றிட வெளியில் மின் உட்புகுதிறன் எல்லாவற்றிற்கும் அடிப்படையாகின்றது. வெற்றிடத்தில் மின் உட்புகுதிறனை ε_o என்று குறிப்பிடுவர். பொருளான ஊடகங்களில் மின் உட்புகுதிறன் (ε_a) வெற்றிட வெளியைக் காட்டிலும் அதிகமாக இருக்கின்றது.

($\varepsilon_a > \varepsilon_o$). இதை ஊடகத்தின் சார்பிலா மின்உட்புகுதிறன் என்பர். இது ஓர் ஊடகத்தின் மின் இடப்பெயர்ச்சிக்கும் (electric displacement). மின்புலச் செறிவிற்கும் உள்ள தகவாகும்.

$$\varepsilon_a = D/E \qquad (4.2)$$

ஓர் ஊடகத்தின் ஒப்பு மின் உட்புகுதிறனை (ε_r), மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி (dielectric constant) என்றும் கூறுவர். இது ஊடகத்தின் மின் உட்புகுதிறனுக்கும், வெற்றிடத்தின் மின் உட்புகுதிறனுக்கும் உள்ள தகவாகும். ($\varepsilon_r = \varepsilon_a/\varepsilon_o$) இது பரிமாணமற்ற ஓர் இயற்பியல் கூறாகும். ஓர் ஊடகத்தில் மின்முனைவாக்கத்தின் தரத்தை மதிப்பிடக்கூடிய ஓர் அளவாக இது உள்ளது.

(ii) மின் இடப்பெயர்ச்சி வெக்டார் (D)

வெற்றிட வெளியில் E என்ற புலச் செறிவுடன் கூடிய ஒரு சீரான மின்புலத்தைக் கருதுவோம். இது புலத்திசைக்குச் செங்குத்தாக உள்ள ஓரலகுப் பரப்பின் வழியாகச் செல்லும் மின்பாயம் (electric flux) ஆகும். இப்போது அந்த வெளியில் ஒரு மின் கடத்தாப் பொருளை வைக்கும்போது மின்புலத்திற்கும், ஊடகத்திலுள்ள அணுக்களுக்குமிடையே ஏற்படும் வினையால் அவ்வூடகத்தில் மின்பாயம் மாற்றத்திற்கு உள்ளாகின்றது. இதுவே மின் இடப்பெயர்ச்சி வெக்டார் எனப்படுகின்றது.

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E_o} = \epsilon_o \epsilon_r E_o \qquad (4.3)$$

வெற்றிடவெளியில் q என்ற மின்னூட்டத்திலிருந்து r என்ற தொலைவில் புலச்செறிவு

$$E_o = q/4\pi\epsilon_o r^2$$

ஊடகம் மின்கடத்தாப் பொருளாக இருப்பின், புலச்செறிவு

$$E_o = q / 4\pi\varepsilon_a r^2$$

வெற்றிடத்தில் மின்புலச் செறிவிற்கும், மின்கடத்தாப் பொருளில் மின்புலச் செறிவிற்கும் உள்ள தகவு மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியாகும்.

$\epsilon_r = \epsilon_o / \epsilon$

மின்இடப்பெயர்ச்சியை, வெற்றிடத்தில் மின்புலச்செறிவு மற்றும் மின்முனைவாக்கம் இவற்றோடு தொடர்படுத்திக் குறிப்பிடமுடியும்.

$$\vec{D} = \epsilon_o \vec{E_o} + \vec{P}$$

$$= \epsilon_o E_0 + \epsilon_o \chi_e E_o \qquad (4.4)$$

$$= \epsilon_o (1+\chi_e) E_o$$

இதை $D = \epsilon_o \epsilon_r E_o$ என்ற தொடர்போடு ஒப்பிட

$$\epsilon_r = (1 + \chi_e)$$

என்ற தொடர்பைப் கூறலாம். மேலும்

$$D = \epsilon_o \epsilon_r E_o = \epsilon_o E + P$$

அல்லது $P / E_o = \epsilon_o(\varepsilon_r - 1)$ (4.5)

(3) மின்னேற்புத்திறன் (Electric Susceptibility)

புலச்செறிவு மிகவும் அதிகமாக இல்லாத போது, மின்முனைவாக்க வெக்டார், புலச்செறிவிற்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது என்பதால்

$$P \alpha E_o$$

அல்லது $\vec{P} = \Sigma_o \chi_e E_o$

χ_e என்பது மின்கடத்தாப் பொருளின் மின்னேற்புத்திறன்,

$$X_e = P / \epsilon_o E_o$$

$P / E_o = \epsilon_o (\epsilon_r - 1)$ என்பதால்

$$\chi_e = (\epsilon_r - 1) \qquad (4.6)$$

4.3. மின்கடத்தாப் பொருளில் வெவ்வேறு வகையான முனைவாக்கம்

நிலைமின்புலத்தில், மின் முனைவாக்க வெக்டார் P, கீழ்க்கண்ட பல்வேறு முனைவாக்க வழிமுறைகளினால் உண்டாகலாம். அவை

1. எலக்ட்ரான் முனைவாக்கம்
2. அயனி முனைவாக்கம்
3. திசையமைவு முனைவாக்கம் (Orientation)
4. விரவல் மின்னூட்ட முனைவாக்கம் (Space Chage)

எலக்ட்ரான் முனைவாக்கம் என்பது, புறமின்புலத்தில் மூலக்கூறிலுள்ள நேர் மற்றும் எதிர்மின்னூட்ட மையங்களின் இடப்பெயர்ச்சியால் ஏற்படுகின்றது. எலக்ட்ரான்கள் நிறை தாழ்ந்தவை என்பதால், அவை நிறைமிக்க அணுக்கருவைவிட அதிகம் இடம்பெயர்கின்றன. இதை எலக்ட்ரான் முனைவாக்கம் என்பர். இதனால் தூண்டப்படும் மின் இருமுனைத் திருப்புத் திறன்

$$\mu = \alpha_e E$$

இதில் α_e என்பது எலக்ட்ரான் முனைவாகு திறன் ஆகும். இது ஒற்றையணு கொண்ட மூலக்கூறுகளாலான வளிமங்கள் இத்தகைய முனைவாக்கத்தை வெளிப்படுத்துகின்றன. எலக்ட்ரான் முனைவாகுதிறன் அணுவின் பருமனுக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது: வெப்பநிலையை பொருத்து மாறுவதில்லை.



படம். 4.2. எலக்ட்ரான் முனைவாக்கம்

அணுவெண் Z உடைய ஓர் அணுவைக் கருதுவோம். எனவே அணுக்கருவில் உள்ள நேர் மின்னூட்டம் +Ze என்றும், புறசுற்றிலுள்ள மொத்த எலக்ட்ரான்களின் எதிர்மின்னூட்டம் -Ze, R ஆரமுடைய கோளத்திலும் இருப்பதாகக் கொள்ளலாம். இக்கோளத்தில் மின்னூட்டச் செறிவு $3Ze/4\pi R^3$

நிலை மின்புலம் செயல்படும் போது, லாரன்ஸ் விசை அணுக்கருவையும், எலக்ட்ரான் மேகத்தின் பொது மையத்தையும் பிரித்து ஒ என்ற இடைவெளியை ஏற்படுத்துகின்றது. இது தொடர்ந்து அதிகரிப்பதில்லை. பிரிதலுக்குப் பின்பு அவைகளுக்கிடையே கூலும் விசை செயல்படுவதே இதற்குக்காரணம். எனவே சமநிலையில் லாரன்ஸ் விசையும், கூலும் விசையும் சமமாயிருக்கும்.

அணுக்கருவால் கவரப்படும் எதிர்மின்னூட்டம், x என்ற ஆரமுடைய கோளத்திலுள்ள ஒரு பகுதி எலக்ட்ரான்மேகம் கொண்டுள்ள மின்னூட்டமாகும். மேகத்தில் எலக்ட்ரானின் செறிவு சீராக இருக்கின்றது எனக்கொண்டால், இதன் மதிப்பு

$$4/3\ \pi x^3\ .3Ze/\ 4\pi R^3 = Ze\ x^3/R^3$$

எனவே லாரன்ஸ் விசையையும், கூலும் விசையையும் ஒப்பிட

$$Ze\ E = Ze.\ (Ze\ x^3\ /\ R^3)\ /\ 4\pi\varepsilon_o x^2$$

$$Zex = 4\pi\epsilon_o R^3E$$

அணுவில் தூண்டப்படும் மின்இருமுனைத் திருப்புத்திறன்

$$\mu_{\text{தூண்டல்}} = Ze.\ x = 4\pi\epsilon_o R^3E$$

$\mu_{\text{தூண்டல்}}$ = eE என்பதால்,

$$\alpha_e = 4\pi\epsilon_o R^3 \qquad (4.7)$$

எலக்ட்ரான் முனைவாக்கத்திற்கும் (α_e) மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலிக்கும் (ε_r) க்கும் உள்ள தொடர்பு

எலக்ட்ரான் முனைவாக்கத்தை $P_e = n\mu_e = n\alpha_e E$ என்று குறிப்பிடலாம். இதில் n என்பது ஓரலகுப்பருமனில் உள்ள அணுக்களின் எண்ணிக்கையாகும். $P/E = \epsilon_o(\epsilon_r\text{-}1)$என்பதால்

$$P/E = n\alpha_e = \epsilon_o\ (\epsilon_r\text{-}1)$$

அல்லது $\alpha_e = \epsilon_o(\epsilon_r\text{-}1)/n$ (4.8)

அயனி முனைவாகுதிறன்

மூலக்கூறிலுள்ள நேர்மின் அயனியும், எதிர்மின் அயனியும் புற மின்புலத்தில் நேர் எதிர் திசையில் இடப்பெயர்வுக்கு உள்ளாவதால், இரு மின்முனைத் திருப்புத்திறன் தூண்டப்பட்டு முனைவாக்கம் பெறுகின்றது. நேர் மற்றும் எதிர் மின் அயனியின் நிறை முறையே m_+, m_- என்போம். இதில் நேர்மின் அயனி x_1 என்ற தொலைவும், எதிர்மின் அயனி x_2 என்ற தொலைவும், ஓய்வுச் சமநிலையிலிருந்து விலகி இருப்பதாகக் கொள்வோம். எனவே அயனி மூலக்கூறின் இரு மின்முனைத் திருப்புத்திறன்

$$\mu_i = e(x_1 + x_2)$$

இது அவற்றின் ஓய்வுச் சமநிலையை நோக்கிச் செயல்படும் மீட்சிவிசை (restoring force) யால் சமநிலைப்படுகின்றது. மீட்சிவிசை (F) இடப்பெயர்ச்சிக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது என்பதால் நேர்மின் அயனிக்கு

$$F \alpha x_1$$
$$= k_1 x_1$$

எதிர்மின் அயனிக்கு

$$F \alpha x_2$$
$$= k_2 x_2$$

இதில் k_2, k_2 என்பன விசைமாறிலிகளாகும். இது அயனிகளின் நிறை மற்றும் அவற்றின் சீரிசை அலைவியக்கத்தின் கோண அதிர்வெண் (ω_o) இவற்றைச் சார்ந்திருக்கின்றது. m, M என்பன முறையே நேர் மற்றும் எதிர்மின் அயனிகளின் நிறையெனில் $k_1 = m\omega_o^2$, $k_2 = M\omega_o^2$,

எனவே

$$F = m\omega_o^2 x_1 = eE$$

$$\text{அல்லது } x_1 = eE/m\omega_o^2$$

இதுபோல எதிர்மின் அயனிக்கு

$$x_2 = eE / M\omega_o^2$$

எனவே புறமின்புலத்தில் அயனிகளுக்கிடைப்பட்ட இடைவெளி

$$x_1 + x_2 = [eE / M\omega_o^2] [1/m + 1/M]$$

எனவே $\mu_i = e(x_1 + x_2) = [e^2E / \omega_o^2] [1/m + 1/M]$

$\mu_i = \alpha_i E$ என்ற பொதுத் தொடர்போடு ஒப்பிட்டு

$$\alpha_i = [e^2 / \omega_o^2] [1/m + 1/M] = [e^2 / \omega_o^2] (m + M / Mm) \quad (4.9)$$

இதில் (1/m + 1/M) என்பது மூலக்கூறின் சுருக்க நிறையாகும் (reduced mass). இத்தொடர்பு அயனிமுனைவாக்கம், அயனி மூலக்கூறின் இயல் அதிர்வெண்ணின் இருமடிக்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கின்றது. இதன் மதிப்பு எலக்ட்ரான் முனைவாகு திறனைவிட பல மடங்கு குறைவானது.

திசையமைவு முனைவாகுத்திறன்

இது முனைவு மூலக்கூறுகளில் மட்டும் உள்ளது. புறமின்புலத்தில் மூலக்கூறின் நேர் மின்பகுதி புலத்திசைப் பக்கமாகவும், எதிர்மின்பகுதி புலத்திசைக்கு எதிர்பக்கமாகவும் திரும்பி அமைகின்றன. இதுவே திசையமைவு முனைவாக்கம் எனப்படும். திசையமைவிற்கு வெப்பக்கிளர்ச்சி எதிராக இருப்பதால் இது வெப்பநிலைக்கு எதிர்விகிதத் தொடர்பில் இருக்கின்றது.

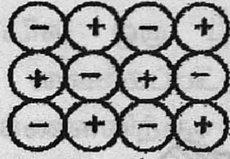
பாராகாந்தத்திற்கான லாஞ்சுவின் (Langevin) கொள்கையைப் பின்பற்றித் திசையமைவு முனைவாக்கத்தைப் பெறலாம். இது

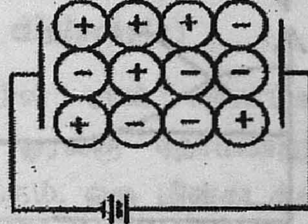
$$P_o = n\mu^2E / 3k_BT = n\alpha_oE$$

என்பதால்,

$$\alpha_o = \mu^2 / 3k_BT \quad (4.10)$$

அதாவது திசையமைவு முனைவாகு திறன், சார்பிலா வெப்ப நிலைக்கு எதிர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது எனலாம்.





புலமில்லாத நிலையில் புலமுள்ளபோது

படம்.4.3. விரவல் மின்னூட்ட முனைவாக்கம்

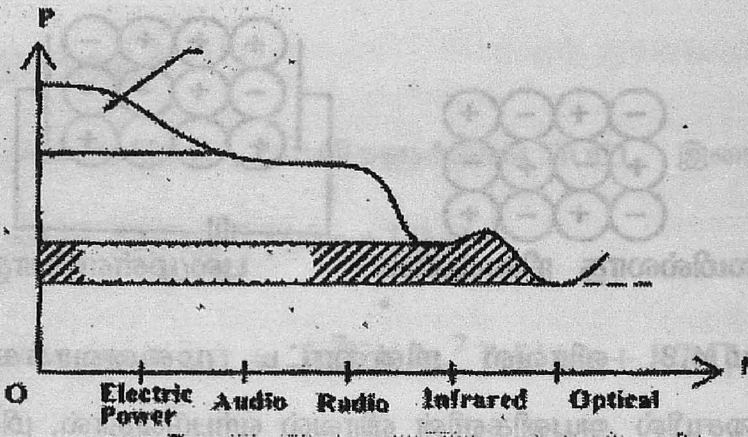
புலத்திசையில் அயனிகளின் விரவல் ஏற்படுவதால், மின்கடத்தாப் பொருளில் உள்ள மின்னூட்டங்கள் திருந்தி அமைகின்றன. இதனால் தூண்டப்படும் முனைவாக்கம் விரவல் மின்னூட்ட முனைவாக்கம் என்பர். பொதுவாக இது பெரைட்டுகள் மற்றும் குறைக்கடத்திகளில் காணப்படுகின்றது. இதன் அளவு பிற முனைவாக்கத்தோடு ஒப்பிட மிகவும் குறைவு எனலாம்.

புறப்புலம் செயல்படும்போது, முனைவாக்கம் நேரம் சார்ந்து ஒரு குறுகிய காலத்தில் ஒரு பெருமத்தை நோக்கி அதிகரிக்கின்றது. [t ஐப் பொறுத்து மாற்றம் பெறும்ஸ முனைவாக்கம; P(t),

$$P(t) = P_s [1 - e^{-t/\tau}] \quad (4.11)$$

இதில் P_s பெரும முனைவாக்கம் ஆகும். இது நெடுநேரம் நிலைமின் புலம் செயல்பட விளைவதாகும். என்பது தளர்வுநேரம் (relaxation time) எனப்படும். முனைவாக்கம், பெரும முனைவாக்கத்தில் 0.63 மடங்கு என்ற நிலையைப் பெறுவதற்கு எடுத்துக் கொள்ளும் காலமாகும். இத்தளர்வு நேரம் வெவ்வேறு வகையான முனைவாக்க முறைகளுக்கு வெவ்வேறானதாக இருக்கின்றது. இதற்குக் காரணம் அவை அதிர்வெண் பொறுத்தும், வெப்பநிலை பொறுத்தும் மாறுபட்டிருப்பதுதான்.

(1) அதிர்வெண் சார்புடைய முனைவாக்கம்



படம். 4.4. அதிர்வெண் பொறுத்த முனைவாக்கம்

எலக்ட்ரான் முனைவாக்கம் மிகமிக விரைவாக நடைபெற்றுப் புறமின்புலம் செயல்பட்டவுடனேயே முழுமை பெறுகின்றது. எலக்ட்ரான் மிகவும் இலேசான துகளாக இருப்பதால் அது ஏறக்குறைய புலத்தின் மாற்றங்களை உணர்ந்து அதற்கேற்ப முனைவாக்கம் பெறுகின்றது. இது உயர் அதிர்வெண்ணுடன் (10^{15} ஹெர்ட்ஸ்) கூடிய மின் புலத்திலும் நடைபெறுகின்றது.

அயனி முனைவாக்கம், எலக்ட்ரான் முனைவாக்கத்தைவிட ஓரளவு குறைவானது. அணித்தள அதிர்வுகளின் (10^{13} ஹெர்ட்ஸ்) அதிர்வெண்ணிற்கு இணையான அதிர்வெண் நெடுக்கையில் இது நிகழ்கின்றது. கட்புலனுணர் ஒளி அதிர்வெண் நெடுக்கையில் அயனி முனைவாக்கம் ஏற்படுவதில்லை.

திசையமைவு முனைவாக்கம், அயனி முனைவாக்கத்தைவிடக் குறைவானது. இதில் தளர்வு நேரம் ஊடகத்தின் மூலப்பொருளையும் சார்ந்திருக்கின்றது. இது 10^{6} ஹெர்ட்ஸ் நெடுக்கையில் ஏற்படுகின்றது.

விரவல் மின்னூட்ட முனைவாக்கம் மிக மிக மெதுவாக நடைபெறுகின்றது. ஏனெனில் இதில் அயனிகள் பல அணுவிடைத் தொலைவிற்கு ஊடுபரவ வேண்டியிருக்கின்றது. இது மிகத் தாழ்ந்த அதிர்வெண் 10^{2} ஹெர்ட்ஸ் நெடுக்கையில் விளைகின்றது. எனவே தாழ்ந்த அதிர்வெண்ணில் நான்கு வகையான முனைவாக்கமும் நிகழும் என்றும் மொத்த முனைவாக்கம் பெருமமாக இருக்கும் என்றும் கூறலாம். அதிர்வெண் அதிகரிக்க மொத்த முனைவாக்கம் குறைகின்றது, கட்புலனுணர் ஒளி அதிர்வெண்ணில் சிறுமமாக இருக்கின்றது.

4.4. மின்கடத்தாப் பொருளின் உள்ளே அகமின்புலம் (Internal field inside the dielectric)

புலவெளியில் ஒரு புள்ளியில் மின் புலச்செறிவு என்பது, அப்புள்ளியில் வைக்கப்பட்டுள்ள ஓரலகு நேர்மின்னூட்டம் பெறும் விசையின் எண்ணளவிற்குச் சமமாகும். ஒரு மின்கடத்தாப் பொருளின் உள்ளே ஒரு புள்ளியில் மின்புலச் செறிவை அறிய, ஒரு சிறிய வெற்றிட வெளியை அங்கு கற்பனை செய்ய வேண்டும். கெல்வின் என்பார் மின்கடத்தாப் பொருளினுள் கருதப்படும் இச்சிறிய வெற்றிய வெளியை உட்புழை (cavity) எனக் குறிப்பிட்டுள்ளார். உட்புழையின் வடிவத்தைப் பொறுத்து, ஓரலகு நேர் மின்னூட்டத்தின் மீது செயல்படும் விசையின் அளவு இருக்கின்றது. இந்த உட்புழை

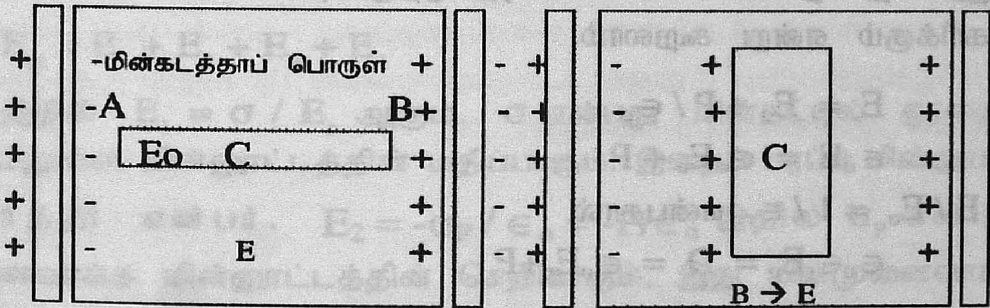
1) சிறிய ஊசி வடிவ உட்புழை

2) தட்டு வடிவ உட்புழை

3) கோள வடிவ உட்புழை

என வகைப்படும்.

i) சிறிய ஊசி வடிவ உட்புழை



படம். 4.5 உட்புழையும் அகமின்புலமும்

AB என்பது ஒரு சிறிய உட்புழையாகும். சிறிய ஊசி வடிவ உட்புழையில் (4.5.அ), அதன்நீளம், அகலத்தைவிட மிகவும் அதிகமாகவும் அதன் அச்சு புலத்திசைக்கு இணையாகவும் இருக்கின்றது. C என்பது உட்புழையின் மையம் என்போம்.

இப்புள்ளியில் ஓரலகு நேர்மின்னூட்டம் வைக்கப்பட்டுள்ளதாகக் கருதி அதன்மீது செயல்படும் விசையை அளவிட்டறிவோம். புறமின்புலத்தால், A,B முனைகளிலுள்ள உட்புழையின் குறுக்குப்பரப்பில் மின்முனைவாக்கத்தால் மின்னூட்டம் கட்டுண்டு நிலைப்பட்டிருக்கின்றது. உட்புழையின் குறுக்குப் பரப்பு மிகவும் குறைவு என்பதால், இந்த தூண்டுதல் மின்னூட்டம் மிகவும் புறக்கணிக்கக்கூடிய அளவில் குறைவாக இருக்கும். எனவே புற மின்புலத்தால், உட்புழை ஏற்படுத்துவதற்கு முன்பு அப்புள்ளியில் என்ன புலமிருக்குமோ அதே புலமே, உட்புழையை உண்டாக்கிய பின்னரும் இருக்குமெனலாம்.

ii) தட்டு வடிவ உட்புழை

ஒரு மின்கடத்தாப் பொருளில் AB என்ற தட்டுவடிவ உட்புழையைக் கருதுவோம் [படம் 4.5 (ஆ)] இதன் விட்டம் தடிப்பை விட மிக அதிகமாக இருப்பதுடன், தடிப்பு புலத்திசைக்கு இணையாகவும் இருக்கின்றது. இதனால் அதன் அகன்ற பக்கப்பரப்புகளில் மின்முனைவாக்கத்தால் கட்டுண்ட மின்னூட்டம் தோன்றி நிலைப்படுகின்றது. எனவே உட்புழையின் மையத்தில் வைக்கப்பட்டுள்ள ஓரலகு நேர் மின்னூட்டத்தின் மீது இந்த மின்னூட்டத் தேக்கம் விசையை ஏற்படுத்துவதால் அகப்புலச்செறிவு அதிகரிக்கும் என்று கூறலாம்.

$$E = E_0 + P / \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 E = \epsilon_0 E_0 + P$$

$E / E_0 = 1 / \epsilon_r$ என்பதால்

$$\epsilon_0 \epsilon_r E_0 = D = \epsilon_0 E_0 + P$$

மின்கடத்தாப் பொருளினுள் மின் இடப்பெயர்ச்சிக்கான அதே விளைவே இங்கு பெறப்பட்டுள்ளது.

ஒரு மின்கடத்தாப்பொருளில் இந்த இரு வகையான உட்புழைகளின் தோற்றம் மின் இடப்பெயர்ச்சிக்கும், அதை அடுத்துச் சுற்றியுள்ள ஊடக வெளியிலுள்ள புலத்திற்கும் எந்த வேறுபாட்டையும் ஏற்படுத்துவதில்லை. இது உட்புழை சிறிய வடிவில் இருக்கும்போது மட்டும் உண்மையாக இருக்கின்றது.

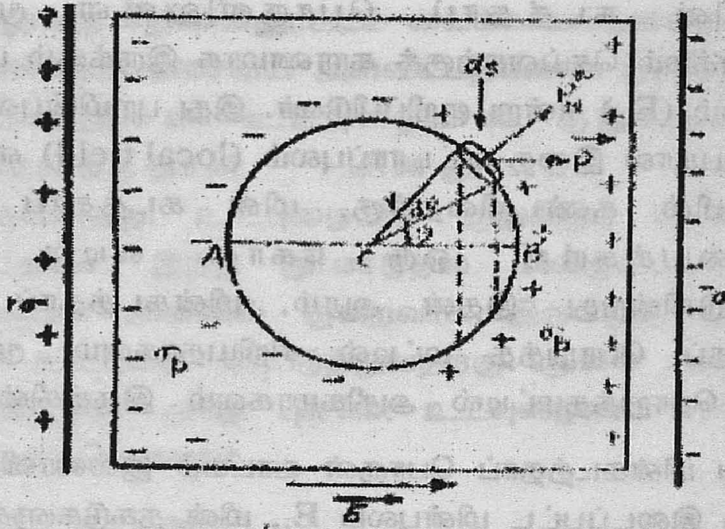
iii) கோளவடிவ உட்புழை - மூலக்கூறுப்புலம்

ஒரு மின் கடத்தாப் பொருளிலுள்ள மூலக்கூறை மின்முனைவாக்கம் செய்வதற்குக் காரணமாக இருக்கும் மின்புலத்தை மூலக்கூறுபுலம் (E_m) என்று குறிப்பிடுவர். இது புறமின்புலத்திலிருந்து வேறுபட்டிருப்பதால் இதை வட்டாரப்புலம் (local field) என்பர். இதை ஒரு புள்ளியில் கண்டறிவதற்கு, மின் கடத்தாப் பொருளில் அப்புள்ளியைச் சுற்றி ஒரு கோள வடிவ உட்புழை ஏற்படுத்தப்படுகின்றது. இதன் ஆரம், மின்கடத்தாப் பொருளின் பரிமாணத்தைப் பொறுத்த மட்டில் சிறியதாகவும், மூலக்கூறிடை வெளியைப் பொறுத்தமட்டில் அதிகமாகவும் இருக்கின்றது.

இடையே மின்கடத்தாப் பொருள் ஊடகம் இல்லாவிட்டால், மின் தகடுகளுக்கு இடைப்பட்ட மின்புலம் E_1, மின் தகடுகளுக்கு அருகில் உள்ள மின்கடத்தாப் பொருளின் பக்கப்பரப்பில் தூண்டப்படும் மினைவாக்க மின்னூட்டம் ஏற்படுத்தும் மின்புலம் E_2, இது உட்புழையின் பக்கப் பரப்புகளில் தூண்டும் முனைவாக்க மின்னூட்டத்தால் ஏற்படும் மின்புலம் E_3, கோள வடிவ உட்புழைக்குள்ளே இருக்கும் மின்கடத்தாப் பொருளிலுள்ள மூலக்கூறுகள் பெற்றிருக்கும் மின் இருமுனைத்தன்மையால் ஏற்படும் மின்புலம் E_4 இவற்றின் கூடுதலே மூலக்கூறுபுலம் அல்லது வட்டாரப்புலம் ஆகும்.

$$E_m = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

இதில் $E_1 = \sigma / E_o$ ஆகும். σ என்பது மின்தட்டில் ஓரலகுப் பரப்பிலுள்ள மின்னூட்டத்தின் மதிப்பாகும். இதைப் பரப்பு மின்னூட்ட அடர்த்தி என்பர். $E_2 = -\sigma_P / \epsilon_o = -P/\epsilon_o$ இதில் σ_P என்பது முனைவாக்க மின்னூட்டத்தின் செறிவாகும், இது மின்முனைவாக்க வெக்டருக்குச் சமமாகும் ($\sigma_P = P$). முனைவுறா மூலக்கூறுகளுக்கு $\mu = 0$ என்பதால், $E_4 = 0$ என்றும், முனைவுறு மூலக்கூறுகளுக்கு $E_4 \neq 0$ என்றும் கூறலாம். எனவே E_3 ஐ மதிப்பிட்டறியும் வழிமுறையைப் பற்றி அறிந்து கொள்ளவேண்டும்.



படம்: 4.6 மின்கடத்தாப் பொருளில் கோளவடிவ உட்புழை

r ஆரமுள்ள கோளவடிவ உட்புழையொன்றைக் கருதுவோம். புலத்திசைக்கு $\theta, \theta + d\theta$ என்ற கோணத்திற்குள் உட்பட்டிருக்கும் னள என்ற பரப்பை உட்புழையின் உட்சுவர் பகுதியின் எடுத்துக் கொள்வோம். மூலக்கூறுகளின் முனைவாக்கம் புலத்திசைக்கு இணையாக இருக்கும். ds பரப்பிற்குச் செங்குத்துக் கூறு $P_N = P\cos\theta$.

முனைவாக்கத்திற்கான வரையறைப்படி, அதன் மதிப்பு ஓரலகு பரப்பிலுள்ள பரப்பு மின்னூட்டமாகும். எனவே ds எனும் நுண்ணலகுப் பரப்பில் முனைவாக்க மின்னூட்டம்

$$q^1 = P_N\, ds$$
$$= P\cos\theta\, ds$$

உட்புழையின் மையத்தில் இதனால் விளையும் மின்புலச்செறிவு

$$(dE) = 1/4\pi\epsilon_0\; q^1 / r^2 = 1/4\pi\epsilon_0\; P\cos\theta\, ds / r^2$$

இது ஆரவழியில் செயல்படுவதால், புலத்திசையில் இதன் ஆக்கக்கூறு

$$(dE)_{11} = 1/4\pi\epsilon_0 .\; P\cos^2\theta / r^2\; ds$$

புலத்திசைக்குச் செங்குத்துக் கூறு,

$(dE)\perp = 1/4\pi\epsilon_o\ P\cos\theta\sin\theta\, ds / r^2$

ds என்ற பரப்பை AB என்ற அச்சு பற்றி உட்புழையின் உட்சுவரைச் சுற்றி எடுத்துவர, r dθ என்ற தடிப்புடன் கூடிய ஒரு வளையம் உருவாகும். இதிலுள்ள ஒவ்வொரு ஒத்த நுண்ணலகுக் கூறும் உட்புழையின் மையத்திலிருந்து சம தொலைவில் உள்ளன. இதன் மொத்தப் பரப்பு $2\pi r^2 \sin\theta\, d\theta$. எனவே மையத்தில் புலத்திசையில் புலச்செறிவுக்கூறு

$$(dE)_{11} = 1/4\pi\epsilon_o P\cos^2\theta / r^2 . 2\pi r^2 \sin\theta\, d\theta$$

$$= P/2\epsilon_o \cos^2\theta \sin\theta\, d\theta$$

மையத்தில் புலத்திசைக்குச் செங்குத்துக்கூறு விட்ட முனைகளில் உள்ள இரு நுண்ணலகுக் கூறுகளின் செங்குத்துக்கூறுகள் ஒன்றுக்கொன்று நேர் எதிராக இருப்பதால், மொத்தத்தில் சுழியாகி விடுகின்றது. எனவே உட்புழையின் மையத்தில், உட்புழையால் தூண்டப்படும் புலச்செறிவு

$$E_3 = \int_0^{\pi} P / 2\epsilon_o \cos^2\theta \sin\theta\, d\theta$$

$$= P / 2\epsilon_o \times 2/3$$

$$= P/3\epsilon_o \qquad (4.12)$$

10.5 கிளாசியஸ் - மொசோட்டி தொடர்பு (Clausius - Mosotti relation)

முனைவிலா மூலக்கூறுகளுக்கு இருமுனை திருப்புத்திறன் இருப்பதில்லை என்பதால் மூலக்கூறு புலத்திற்கு இதன் பங்களிப்பு சுழியாகி விடுகின்றது. எனவே

$$E_{மூலக்கூறு} = E_1 + E_2 + E_3$$

$$= \sigma / \epsilon_o - \sigma_P / \epsilon_o + P/3\epsilon_o$$

மின்முனைத் தகடுகளுக்கு இடையில் விளைவு மின்புலத்தின் செறிவு E எனில்

$$E = \sigma / \epsilon_0 - \sigma p / \epsilon_0$$

எனவே

$$E_{மூலக்கூறு} = E + P/3\epsilon_0$$

மேலும்

$D = \epsilon E \epsilon_0 E + P$ என்பதால்

$E = P/\epsilon - \epsilon_0$ எனலாம்.

இம்மதிப்பைப் பதிலீடுசெய்ய

$$E_{மூலக்கூறு} = P/\epsilon - \epsilon_0 + P/3\epsilon_0$$

$$= P/3\epsilon_0 (\epsilon + 2\epsilon_0 / \epsilon - \epsilon_0) \quad (4.13)$$

n என்பது ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை என்றும் α_e என்பது எலக்ட்ரான் முனைவாகுதிறன் என்றும் கொண்டால், முனைவாக்கம்,

$$P = n\alpha_e E_{மூலக்கூறு}$$

அல்லது $E_{மூலக்கூறு} = P / n\alpha_e$

இவ்விரு தொடர்பையும் ஒப்பிட

$$P / n\alpha_e = P / 3\epsilon_0 . (\epsilon + 2\epsilon_0) / (\epsilon - \epsilon_0)$$

$$n\alpha_e / 3\epsilon_0 = \epsilon - \epsilon_0 / \epsilon + 2\epsilon_0 = \epsilon_0(\epsilon/\epsilon_0 - 1) / \epsilon_0 (\epsilon / \epsilon_0 + 2)$$

$$n\alpha_e / 3\epsilon_0 \quad . \quad = \quad \epsilon_r - 1 / \epsilon_r + 2 \quad (4.14)$$

ε_0 என்பது ஒப்புமின் உட்புகுதிறன் அல்லது ஊடகத்தின் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி ஆகும். இத்தொடர்பே கிளாசியஸ் - மெசோட்டி சமன்பாடு எனப்படுகின்றது.

சிறப்பு நிலைப் பண்புகள்

(i) மின் காந்த அலைக் கொள்கைப்படி, ஒளி பரவும் திசைவேகம் (c)

$$c = 1/\sqrt{\mu\epsilon}$$

இதில் μ என்பது ஊடகத்தின் காந்த உட்புகுதிறனையும், ε என்பது மின்உட்புகு திறனையும் குறிப்பிடுகின்றது. காந்தமில்லாத ஊடகத்திற்கு $\mu = \mu_o$ என்று கொள்ளலாம். ஓர் ஊடகத்தின் ஒளிவிலகல் எண் என்பது, வெற்றிடத்தில் ஒளியின் திசைவேகத்திற்கும், அவ்வூடகத்தில் ஒளியின் திசை வேகத்திற்குமுள்ள தகவாகும்.

$$\mu = c_o/c_m = \sqrt{\mu_o\epsilon_m / \mu_o\epsilon_o} = \sqrt{\epsilon_m / \epsilon_o} = \sqrt{\epsilon_r}$$

இத்தொடர்பு முனைவிலா மூலக்கூறுகளுக்கு இணக்கமாக இருக்கின்றது. எனவே கிளாசியஸ் - மொசோட்டி சமன்பாட்டை

$n\alpha / 3\epsilon_o = \mu^2 - 1 / \mu^2 + 2$ எனலாம். (4.15)

முனைவிலா மூலக்கூறுகளாலான மின்கடத்தாப் பொருளுக்கு ஏற்புடைய இத்தொடர்பை லாரன்ஸ் சமன்பாடு என்பர். இது, ஒப்பு மின் உட்புகுதிறன் அதிர்வெண் சார்புடையதாக இல்லாதிருக்கும் போது உண்மையாக இருக்கின்றது.

(ii) கிளாசியஸ் - மொசோட்டி சமன்பாட்டை M /d ஆல் பெருக்கவும். இதில் M என்பது மின்கடத்தாப் பொருளின் மூலக்கூறு நிறையாகும்; d என்பது ஊடகத்தின் அடர்த்தியாகும்.

$$n\alpha /3\epsilon_o . M /d = \epsilon_r - 1 / \epsilon_r + 2 . M /d$$

ஆனால் $nM / d = N$, அவகாட்ரோ எண்ணாகும்.

$$N\alpha / 3\epsilon_o = (\epsilon_r - 1 / \epsilon_r + 2) . M / d \quad (4.16)$$

இது கிளாசியஸ் - மொசோட்டி சமன்பாட்டின் மற்றோர் வடிவமாகும். இதில் N என்பது ஒரு மோலார் செறிவுள்ள மொத்த மூலக்கூறுகளின் முனைவாகுதிறனாகும். இதை மோலார்

முனைவாகுதிறன் என்பர்.

(iii) ஒற்றை அணுக்களாலான வளிமத்திற்கு (4.7)-ன் படி

$$\alpha = 4\pi\epsilon_o R^3$$

இதில் R என்பது மூலக்கூறின் செயல்திறனுடைய ஆரமாகும். எனவே சமன்பாடு (4.13)ன் படி

$$n\alpha / 3\epsilon_o = n4\pi\epsilon_o R^3/3\epsilon_o = \epsilon_r\text{-}1 / \epsilon_r\text{+}2$$

அல்லது $R^3 = 3 / 4\pi n \ \epsilon_r\text{-}1 / \epsilon_r\text{+}2$ (4.17)

மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி ε_r ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை இவற்றைக் கொண்டு மூலக்கூறின் ஆரத்தைக் கணக்கிட்டறியலாம்.

(iv) வளிமங்களில் மூலக்கூறுகள் ஒன்றுக்கொன்று இடைவினை ஏதுமின்றித் தனித்து இயங்குகின்றன. எனவே $\varepsilon_r \rightarrow 1$

$$\epsilon_r\text{-}1/3 = n\alpha / 3\epsilon_o$$

அல்லது $\alpha = \epsilon_r(\epsilon_r - 1) / n = \epsilon_o\chi_e/n$

ஏனெனில் $\epsilon_r = 1 + \chi_e$ (4.18)

4.6. முனைவு மூலக்கூறுகளின் முனைவாக்கம் (லாஞ்சுவின் - டிபை சமன்பாடு)

முனைவு மூலக்கூறு முனைவாகுதிறன் α, வெப்பநிலையைப் பொறுத்திருக்கின்றது. முனைவு மூலக்கூறுகளைப் புறமின்புலத்தின் தாக்கத்திற்கு உட்படுத்தினால், தூண்டல் முனைவாக்கத்துடன் மூலக்கூறின் இருமுனைத் தன்மையால் நிரந்தரமான முனைவாக்கமும் சேர்ந்து கொள்கின்றது. இதன் இயற்பியல் கொள்கை பாரா காந்தத்திற்கான லாஞ்சுவின் கொள்கையை ஒத்திருக்கின்றது.

புறப்பலம் ஏதும் இல்லாதபோது மூலக்கூறின் இருமுனை எல்லாத் திசைகளிலும் சம வாய்ப்புடன் திரும்பி இருப்பதால், மொத்த முனைவாக்கம் சுழியாகும். புறப்புலம் செயல்படும்போது, இந்த மூலக்கூறு இருமுனைகள், புலத்திசை நோக்கித் திரும்ப

முயலுகின்றன. ஆனால் ஒரு குறிப்பிட்ட திசை நோக்கித் திரும்பும் இந்த முயற்சி வெப்பக் கிளர்ச்சியால் தடுக்கப்படுவதால், புலச்செறிவின் வலிமைக்கு ஏற்ப ஒரு சமநிலை ஏற்படுகிறது. அதனால் மூலக்கூறின் இருமுனைகள் புலத்திசைக்கு 0 முதல் 180 டிகிரி கோணம் வரையில் திரும்பி இருந்தாலும் புலத்திசையில் கூடுதலாகத் திரும்பி இருக்கும் எனலாம். புலத்திசையில் அவற்றின் பங்களிப்பைக் கணக்கிட்டுச் சராசரி முனைவாக்கத்தை மதிப்பிட்டறியலாம்.

மூலக்கூறின் மொத்த முனைவாக்கத்தை $P = P_i + P_P$ இதில; P_i என்பது தூண்டல் முனைவாக்கமாகும், P_P என்பது நிரந்தர முனைவாக்கமாகும். q என்ற நேர் - எதிர் மின்னூட்டம் 2r என்ற இடைவெளியுடன், புலத்திசைக்குத் θ கோணத்தில் சாய்ந்திருப்பதாகக் கொள்வோம். இதன் மீது செயல்படும் சுழற்சி இயக்க விசை

$$\tau = NE\,2r\,\text{Sin}\,\theta = \mu E\,\text{Sin}\,\theta$$

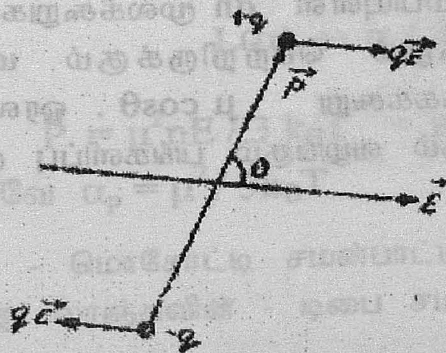
μ என்பது மூலக்கூறின் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறனாகும் dθ என்ற கோணத்திற்குச் சுழலும் போது, செய்யப்படும் வேலை

$$dW = \tau\, d\theta$$

$$= \mu E\,\text{Sin}\,\theta\, d\theta$$

எனவே θ கோணம் சுழலும் போது செய்யப்படும் மொத்த வேலை

$$W = \int_o^\theta dW = \mu E \int_o^\theta \text{Sin}\,\theta\, d\theta = -\mu E\,\text{Cos}\,\theta$$



படம் 4.7 புறப்புலத்தில் மின் இருமுனை

இது மின் இருமுனையில் நிலையாற்றலாகச் சேமிக்கப்படுகின்றது.

புள்ளியியற் கொள்கைப்படி, (i) புலத்திசைக்கு $\theta, \theta + d\theta$ கோணத்தில் திரும்பி இருக்கும் மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை $\sin\theta \; d\theta$-க்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.

(ii) ஆற்றலின் சமப்பகிர்வு நெறிமுறைப்படி, W என்ற நிலையாற்றலுடைய மூலக்கூறுகளின் எண்ணிக்கை e^{-W/k_BT} -க்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.

ஓரலகுப் பருமனுள்ள மின்கடத்தாப் பொருளைக் கருதுவோம். இதிலுள்ள n மூலக்கூறுகளில் dn மூலக்கூறுகள் மின் இருமுனை அச்சு, புலத்திசைக்குத் கோணம் சாய்ந்திருப்பதாகக் கொள்வோம்.

$$dn \;\alpha\; e^{\mu E \cos\theta / k_B T} \sin\theta \, d\theta$$

$$= C e^{\mu E \cos\theta / k_B T} \sin\theta \, d\theta$$

இதில் C என்பது ஒரு மாறிலி $\mu E / k_B T = \alpha$ எனில்

$$dx = C e^{\alpha \cos\theta} \sin\theta \, d\theta$$

எல்லா அமைவு நிலைகளிலும் உள்ள மூலக்கூறுகளின் மொத்த எண்ணிக்கை n என்பதால்

$$n = \int dn = C \int_0^{\pi} e^{\alpha \cos\theta} \sin\theta \, d\theta$$

$$= C \, [e^{\alpha} - e^{-\alpha}] / \alpha$$

எனவே $C = n\alpha \, / \, (e^{\alpha} - e^{-\alpha}) = na \, / \, 2 \sin h\alpha$ (4.19)

θ கோணம் திரும்பியுள்ள dn மூலக்கூறுகள் புலத்திசையில் ஒவ்வொரு மூலக்கூறும் பெற்றிருக்கும் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறனின் ஆக்கக்கூறு $\mu \cos\theta$. ஓரலகுப் பருமனிலுள்ள எல்லா மூலக்கூறுகளும் வழங்கும் பங்களிப்பு முனைவாக்கமாகும். எனவே

$$P = \int_{0}^{\pi} \mu \cos\theta \, dn$$

$$= C\mu \int_{0}^{\pi} e^{\alpha \cos\theta} \cos\theta \sin\theta \, d\theta$$

பாராகாந்தத்திற்கான லாஞ்சுவின் கொள்கையில் பின்பற்றியது போல, அதே வழிமுறைப் பின்பற்றி

$P = \mu n\,(\cot h\alpha - 1/\alpha)$

இதில் μn என்பது ஓரலகு பருமனிலுள்ள அனைத்து மூலக்கூறுகளும் புலத்திசையில் திரும்பி இருப்பதால், அவற்றின் மொத்த இருமுனைத் திருப்பு திறனாகும். இது அப்பொருளின் பெரும மதிப்பு என்பதால் இதை பெரும முனைவாக்கம் எனலாம். இதை P_s எனக்குறிப்பிட்டால் $P_s > P$

$P = P_s\,(\cot h\alpha - 1/\alpha)$

அல்லது $P / P_s = (\cos h\alpha - 1/\alpha) = L(\alpha)$ (4.20)

$L(\alpha)$ என்பது லாஞ்சுவின் சார்பாகும். $L(\alpha)$ க்கும் a-க்கும் வரையப்படும் வரைகோடு லாஞ்சுவின் வரைபடமாகும். இது P / P_s-ன் மதிப்பு α-ன் மதிப்பு அனந்தத்தைத் தொட 1-ஐ எட்டுகின்றது, தொடக்கத்தில் α அதிகரிக்க $L(\alpha)$ நேர்விகிதத் தொடர்பில் அதிகரிப்பதுபோல அதிகரிக்கின்றது. இது ஆய மையத்தில் வரைகோட்டிற்கு வரையப்படும் தொடுகோட்டோடு ஒன்றியிருக்கின்றது. α-ன் மதிப்பு மிகவும் தாழ்வாக இருக்கும்போது $\mu E << k_B T$ அதாவது உயர் புறமின்புலம் அல்லது தாழ்ந்த வெப்பநிலையில்

$$L(\alpha) \rightarrow \alpha / 3$$

எனவே $P = \mu^2 nE / 3k_B T = n\alpha_p E$

எனவே $\alpha_p = \mu^2 / 3k_B T$

கிளாசியஸ் - மொசோட்டி சமன்பாட்டில் இதை உட்புகுத்தித் திருத்தம் செய்து லாஞ்சுவின் - டிபை சமன்பாட்டைப் பெறலாம்.

$$n(\alpha_i + \alpha_p) / 3\epsilon_o = \epsilon_r - 1 / \epsilon_r + 2$$
$$n / 3\epsilon_o [\alpha_i + \mu^2 / 3k_BT] = \epsilon_r - 1 / \epsilon_r + 2 \quad (4.21)$$

(V) மூலக்கூறின் மின்இருமுனைத் திருப்புத்திறன்

கிளாசியஸ் - மொசோட்டி சமன்பாட்டைப் பயன்படுத்தி மூலக்கூறின் மின் இருமுனைத் திருப்புத்திறனைக் கண்டறியமுடியும். சமன்பாடு 4.15-ன் படி மோலார் முனைவாக்கம்

$$P_m = N\alpha/3\epsilon_o = (\epsilon_r - 1/ \epsilon_r + 2) . (M/d)$$

இதில் முனைவாகுதிறன், எலக்ட்ரான், அயனி மற்றும் திசையமைவு முனைவாகுதிறன்களின் கூடுதலாகும்.

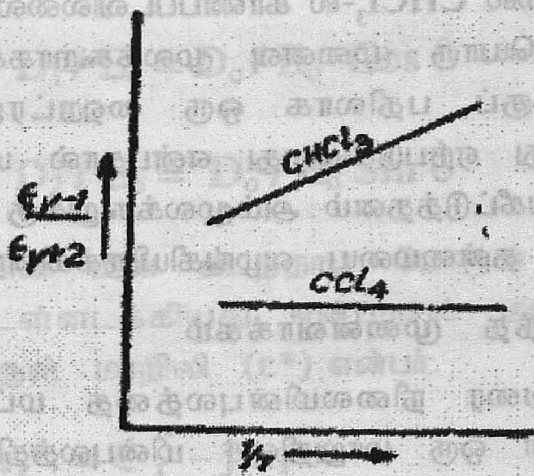
$$\alpha = \alpha_e + \alpha_i + \alpha_o$$

இதில் $\alpha_e + \alpha_i = \alpha^1$ என்றும் $\alpha_o = \mu^2 / 3k_BT$ (4.10ன் படி) என்றும் கொண்டு

$$P_m = N/3\epsilon_o [\alpha^1 + \mu^2 / 3k_BT] = \epsilon_r - 1/\epsilon_r + 2 \quad M/d$$
$$N\mu^2/9\epsilon_o k_B = (\epsilon_r - 1 / \epsilon_r + 2 \ . M/d) - (N\alpha^1/3\epsilon_o) / (1/T) \quad (4.22)$$

சோதனையில் பெறப்பட்ட புள்ளி விவரங்களைக் கொண்டு $\varepsilon_r - 1 / (\varepsilon_r + 2) (M/d)$ க்கும் $1/T$ க்கும் ஒரு வரைபடம் வரையலாம். இது சரிவுடன் கூடிய ஒரு நேர் கோடாக அமையும். இதன் சரிவு $dy/dx = \tan\theta$ என்பது $N\mu^2/9\epsilon_o k_B$ க்கும் சமம் என்பதால்,

$$\mu^2 = 9\epsilon_o k_B / N . (dy/dx)$$

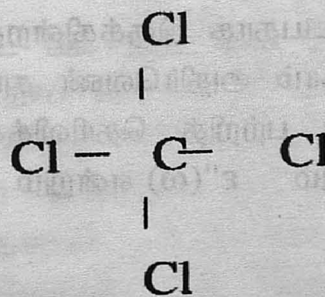


படம். 10.8

அல்லது $\mu = 3\sqrt{\epsilon_0 k_B / N \ (dy/dx)}$

மின் இருமுனைத் திருப்புத் திறன் சுழியாக இருக்குமெனில், வரைபடத்தில் வரைகோடு x அச்சுக்கு இணையாக அமைந்த நேர்கோடாக இருக்கும். அதாவது முனைவாக்கம் வெப்பநிலையைப் பொறுத்து மாற்றத்திற்கு உள்ளாவதில்லை எனலாம்.

முனைவு மூலக்கூறின் முனைவாகுதிறன் வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருக்கின்றது என்பதை (4.21) உணர்த்துகின்றது. CCl_4-க்கான வரைக்கோடு அது முனைவிலா மூலக்கூறு எனத் தெரிவிக்கின்றது. அதாவது அதன் கட்டமைப்பில் குளோரின் அணுக்கள், மையத்திலுள்ள கார்பன் அணுவுடன் சமச்சீராகப் பிணைந்துள்ளன என்று கூறலாம். இதனால் மூலக்கூறின் நேர் மற்றும் எதிர் மின்னூட்டங்களின் பொது மையங்கள் எப்போதும் ஒன்றியிருக்கின்றன



படம். 4.9 CCl4 - கட்டமைப்பு

ஆனால் இந்நிலை $CHCl_3$-ல் காணப்படவில்லை. அதன் சாய்வான வரைகோடு அதையொரு முனைவு மூலக்கூறாகக் காட்டுகின்றது. ஒரு குளோரினுக்குப் பதிலாக ஒரு ஹைட்ரஜனைப் பதிலீடு செய்யும்போது இது ஏற்படுகின்றது என்பதால் மின்னூட்டங்களின் சீர்மையில்லாப் பங்கீட்டுத்தனம் அம்மூலக்கூறுக்கு நிரந்தரமான ஒரு மின் இருமுனைத் தன்மையை வழங்கியிருக்கின்றது.

அதிர்வெண் சார்ந்த முனைவாக்கம்

நாம் இது வரை நிலைமின்புலத்தை மட்டுமே கருத்திற் கொண்டோம். இனி ஒரு மாறுதிசை மின்புலத்தில் மின்கடத்தாப் பொருளின் பண்புகளை அறிய முயல்வோம். புலச்செறிவு அலைச்சீர்மையுடன் தொடர்ந்து மாறிக் கொண்டே இருப்பதால் முனைவாக்கமும் மின் இடப்பெயர்சியும் அதற்கேற்பத் தொடர்ந்து மாறிக் கொண்டேயிருக்கும். எனினும் இவையிரண்டும் மின்புலத்திற்குப் பின்தங்கிய அலைக்கட்டத்தில் தொடர்ந்து வரும். மாறுதிசை மின்புலத்தை

$$E = E_0 \cos \omega t$$

எனக் குறிப்பிடுவோம். எனவே மின் இடப்பெயர்ச்சி

$$D = D_0 \cos(\omega t - \delta) = D_1 \cos \omega t + D_2 \sin \omega t \qquad (4.23)$$

இதில் δ என்பது அலைக்கட்டக் கோணமாகும். இதில்

$$D_1 = D_0 \cos \delta,\ D_2 = D_0 \sin \delta$$

பெரும்பாலான மின்கடத்தாப் பொருள்களுக்கு D_0-ன் மதிப்பு E_0-க்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. எனினும் D_0/E_0 பொதுவாக அதிர்வெண் தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது. இதை முழுமையாகப் புரிந்து கொள்வதற்கு நாம் அதிர்வெண் சார்ந்த இரு மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியைப் பற்றித் தெரிவிக்க வேண்டியிருக்கின்றது. அவற்றை $\varepsilon^1(\omega)$ என்றும் $\varepsilon''(\omega)$ என்றும் குறிப்பிடுவார்கள்

$$\epsilon'(\omega) = D_1 / E_o = D_o / E_o \cos\delta$$

$$\epsilon''(\omega) = D_2 / E_o = D_o / E_o \sin\delta \quad (4.24)$$

ஒரு பொருளின் மின் கடத்தாப் பொருள் மாறிலி இவ்விரு கூறுகளையும் உள்ளடக்கியது என்பதால் அதை ஆற்றலிழப்பு மின்கடத்தாப்பொருள் மாறிலி (ε^*) என்பர்.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (4.25)$$

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)} \quad (4.26)$$

ϵ', ϵ'' இரண்டும் அதிர்வெண் சார்ந்திருப்பதால், அலைக்கட்டக் கோணம் δ-ம் அதிர்வெண் சார்ந்தது எனலாம்.

$$D(t) = \epsilon_o\epsilon_r^* E_o \cos\omega t$$

$= \epsilon_o[\epsilon' - j\epsilon'']$ உண்மை மதிப்பு $(E_o e^{j\omega t})$

$= \epsilon_o E_o$ உண்மை மதிப்பு $(\epsilon' - j\epsilon'')(\cos\omega t + j\sin\omega t)$

$$= \epsilon_o E_o [\epsilon' \cos\omega t + \epsilon'' \sin\omega t]$$

மின்னூட்ட அடர்த்தி $J(t) = d/dt\, D(t)$ என்பதால்

$$J(t) = \epsilon_o E_o \omega[\epsilon'' \cos\omega t - \epsilon' \sin\omega t] \quad (4.27)$$

அதாவது மின்னூட்ட அடர்த்தி இரு கூறுகளைப் பெற்றுள்ளது. '(ஆற்றலிழப்பு மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியின் உண்மை மதிப்பு) செயல்படும் மின்புலத்திற்கு 90° மாறுபட்டு அலைகட்டத்தைப் பெற்றுள்ளது. அதனால் மின்னோட்டம், மின்னழுத்தத்திற்கு 90° முன் செல்கின்றது. அதனால் ε' பொருட்டு ஊடகத்தில் ஆற்றல் இழப்பு ஏதும் இருப்பதில்லை. ε'' (ஆற்றலிழப்பு மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியின் மதிப்பு) செயல்படும் மின்புலத்திற்கு ஏற்ப அதே அலைக்கட்டத்தில் இருக்கின்றது. அதனால் மின்னோட்டம்,

மின்னழுத்தத்திற்கு மிகச்சரியாக 90° முன் செல்வதில்லை. அதனால் ε'' பொருட்டு ஊடகத்தில் ஆற்றல் இழப்பு ஏற்படுகின்றது.

4.8. அதிர்வெண் சார்ந்த எலக்ட்ரான் முனைவாகுதிறன் (Frequency dependence of the Electronic Polarisability)

மாறுதிசை மின்புலத்தின் கோண அதிர்வெண் என்றும், மின்புலத்தின் அலைவீச்சுக்கு ஏற்ப எலக்ட்ரானின் இடப்பெயர்ச்சி தூண்டப்படுவதால் அதை x(t) என்றும் கொள்வோம். எனவே அவ்வமைப்பின் இருமுனைத் திருப்புத்திறன்

$\mu = -e\, x(t)$

எலக்ட்ரானை அதன் பொதுமையத்திலிருந்து விலகி இருக்கத் தூண்டும் லாரன்ஸ் விசை $eE_o e^{j\omega t}$ ஆகும். உராய்வின் காரணமாக எலக்ட்ரானின் அலைவியக்கம் தடைப்படுவதால், ஒரு தடை விசை (damping force) இயக்கத்திற்கு எதிராக மீட்சி விசையோடு செயல்படும். தடைவிசை எலக்ட்ரானின் திசைவேகத்திற்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது. தடைவிசையால் ஏற்படும் இழப்பு ஒவ்வொரு அலைவின்போதும் ஊட்ட விசையால் சமன் செய்யப்படுகின்றது. எனவே அலையியக்கச் சமன்பாடு

$$m\, d^2x / dt^2 = -r\, dx/dt - kx + F \qquad (4.28)$$

$$d^2x / dt^2 + r/m \;\; dx / dt + \omega_o^2 x = -eE_o/m \cos \omega t$$

அலைவுறும் மின் இருமுனையின் இயல் அதிர்வெண் o, தூண்டும் மின்புலச் செறிவின் அதிர்வெண் விட வேறுபட்டதாக இருக்கலாம். தொடக்கத்தில் அமைப்பு தனக்குரிய இயல் அதிர்வெண்ணுடன் அதிர்வுறும், ஆனால் தூண்டும் விசை தன் இயல் அதிர்வெண்ணை அதன்மீது திணிக்கும். பிறகு அலைவுறும் அமைப்பின் தனித்த அதிர்வுகள் ஒழிந்து திணிப்பதிர்வாக ஊட்ட விசையின் அதிர்வெண்ணோடு அதிர்வுறும் எனலாம்.

இதன் பொதுத்தீர்வாக $x(t) = x_o \cos\; t$ எனக் கொள்ளலாம். அதாவது $x(t) = x_o$ உண்மை மதிப்பு $e^{j\omega t}$ எனக்கொள்ளலாம். dx/dt = உன்மை மதிப்பு $(j\omega x)$; d^2x / dt_2 = உண்மை மதிப்பு $(-\omega^2 x)$ இம்

மதிப்புகளை இயக்கச் சமன்பாட்டில் பதிலீடு செய்ய உண்மை மதிப்பு $(-\omega^2 x + \upsilon/m\, j\omega x + \omega_o^2 x)$ = உண்மை மதிப்பு $(-e/m\, E_o e^{j\omega t})$

x_o உண்மை மதிப்பு $[(\omega_0^2 - \omega^2) + j\, \upsilon/m\ \omega] = -e / m\, E_o$

அல்லது x_o = உண்மை மதிப்பு $[(-e / E_o / m\ (\omega_0^2 - \omega^2) + j\upsilon\omega]$

இம்மதிப்பைப் பொதுத்தீர்வில் பதிலீடு செய்ய

$x(t)$ = உண்மை மதிப்பு $-eE_o e^{j\omega t} / m\ (\omega_0^2 - \omega^2) + j\upsilon\omega$ (4.29)

எனவே தூண்டல் மின் இருமுனைத் திருப்புதிறன்

$\mu_e = -e\, x(t)$

= உண்மை மதிப்பு $[e^2 E_o e^{j\omega t} / m(\omega_0^2 - \omega^2) + j\upsilon\omega]$

ஆனால் μ_e = உண்மை மதிப்பு $[\alpha_e * E_o\, e^{j\omega t}]$ (4.30)

இவ்விரு தொடர்புகளையும் ஒப்பிட

$\alpha_e * = e^2 / m(\omega_0^2 - \omega^2) + j\upsilon\omega$

$m(\omega_0^2 - \omega^2) - j\upsilon\omega$ ஆல் மேல் மற்றும் கீழ் பின்னங்களைப் பெருக்க

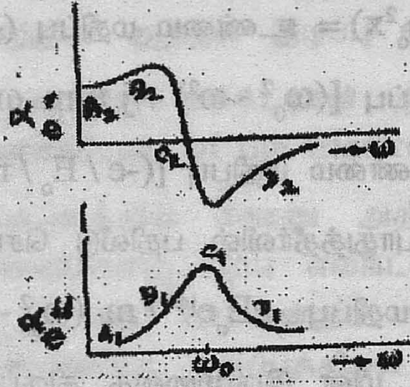
$\alpha_e * = e^2 [\, m(\omega_0^2 - \omega^2) - j\upsilon\omega / m^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \upsilon^2\omega^2\,]$

இதை $\alpha_e * = \alpha_e{}^1 - j\, \alpha_e{}^{11}$ என்ற பொதுத் தொடர்புடன் ஒப்பிட்டு α_e', α_e''-ன் மதிப்புகளைப் பெறலாம்

$\alpha_e' = e^2 m(\omega_0^2 - \omega^2) / m^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \upsilon^2\omega^2$ (4.31)

$\alpha_e'' = e^2 \upsilon\omega / m^2 (\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \upsilon^2\omega^2$ (4.32)

முனைவாகுதிறனின் இவ்விரு கூறுகளும், அதிர்வெண் பொறுத்து எங்ஙனம் மாறுபடுகின்றன என்பதை வரைபடம் மூலம் காட்டலாம்.



படம். 4.10 e', e''-ன் அதிர்வெண் சார்பு

நிலை.1

$\omega = 0$ எனில்

$\alpha_e' = e^2 / m\omega_o^2, \ \alpha_e'' = 0$

இது வரைபடத்தில் A_1, A_2 ஆகக் காட்டப்பட்டுள்ளது.

எனவே α_e'-ன் பொருட்டு உட்கிரகிப்பு ஏதுமிருப்பதில்லை.

நிலை.2

$\omega < \omega_o$ எனில் α_e', α_e'' இரண்டும் நேரெண் மதிப்புகளைக் கொண்டுள்ளன. இது வரைபடத்தில் B_1, B_2 ஆகக் காட்டப்பட்டுள்ளது.

நிலை.3

$\omega = \omega_o$

$\alpha_e' = 0, \alpha_e'' = e^2 / \upsilon\omega_o$

இந்நிலையில் ஆற்றல் உட்கிரகிப்பு மிகவும் அதிகமாக இருக்கும். இது C_1, C_2 ஆகக் காட்டப்பட்டுள்ளது.

நிலை.4

$\omega > \omega_o$ எனில் α_e' எதிரெண் மதிப்புடையாகவும், α_e'' நேரெண் மதிப்புடையதாகவும் இருக்கின்றன. இது வரைபடத்தில் D_1, D_2 ஆகக் காட்டப்பட்டுள்ளது.

ω-ன் மதிப்பு $\Delta\omega$ அளவு மாறுபடும்போது, அது α_e', α_e''-ல் ஏற்படுத்தும் மாற்றத்தையும் அறியலாம்.

$$\omega_o^2 - \omega^2 = (\omega_o - \omega)(\omega_o + \omega) = 2\omega_o\Delta\omega$$

எனவே

$$\alpha_e' = 2me^2\omega_0\Delta\omega / 4m^2\omega_0^2(\Delta\omega)^2 + \upsilon^2\omega_o^2 \quad (4.31)$$
$$= 2e^2m\,\Delta\omega / [4m^2(\Delta\omega)^2 + \upsilon^2]\,\omega_o$$
$$\alpha_e'' = e^2\upsilon\omega_o / 4m^2\omega_0^2(\Delta\omega)^2 + \upsilon^2\omega_o^2$$
$$= e^2\upsilon / [4m^2(\Delta\omega)^2 + \upsilon^2]\,\omega_o$$

ஆற்றலிழப்பு மின் கடத்தாப் பொருள் மாறிலியை, ஆற்றலிழப்பு முனைவாகுத் திறனுடன் தொடர்புபடுத்தலாம்

$$P = n\alpha^* E = n(\alpha' - j\alpha'')E$$
$$= \epsilon_o x_e E = \epsilon_o(\epsilon_r - 1)E$$
$$= \epsilon_o[\epsilon' - j\epsilon'' - 1]E$$

உண்மை மற்றும் கற்பனை மதிப்புகளை ஒப்பிட

$$n\alpha' = \epsilon^o(\epsilon' - 1)E' = 1 + n\alpha'/\epsilon_o$$
$$n\alpha'' = \epsilon_o\epsilon'' : \epsilon'' = n\alpha''/\epsilon_o$$

படம்.4.7 லிருந்து, α' எனவே ε', வலிமையாக அதிர்வெண்ணுடன் தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது என்றும் மின் ஏற்புத்திறனின் (χ) மதிப்பு குறி மாற்றம் பெறுகின்றது என்றும் கூறலாம். இதை முரணிய பிரிகை (anomalous dispersion) என்பர். ε''-ன் மதிப்பு $\omega = \omega_o$ என்ற நிலையில் பெருமமாகவும், இருமருங்கும் குறைவாகவும் உள்ளது. ஊடகத்தால் உட்கிரகிக்கப்படும் திறன் இயல் அதிர்வெண்ணில் பெருமமாக இருக்கின்றது. இதை ஒத்ததிர்வு உட்கிரகிப்பு (Resonant absorption) என்பர்.

4.9 மின்கடத்தாப் பொருள் ஆற்றல் இழப்பு (Dielactric Loss)

ஒரு மின்கடத்தாப் பொருள் மின்புலத்தின் தாக்கத்திற்கு உட்படும்போது மின் ஆற்றலை உட்கிரகிக்கின்றது. அதில் ஒருபகுதி வெப்ப ஆற்றலாகப் புறவெளியில் உமிழப்படுகின்றது. இதுவே மின்கடத்தாப் பொருள் ஆற்றல் இழப்பு என்பர். ஒரு திசை மற்றும் மாறுதிசை மின்னழுத்தங்கள் என இருவகைகள் செயல்படும் போதும் இப்படி இழக்கப்படுகின்றது. எனினும் மாறுதிசை மின்னழுத்தத்தைவிட ஒரு திசை மின்னழுத்தத்தில் குறைந்த அளவு ஆற்றலே இழக்கப்படுகின்றது. இந்த ஆற்றல் இழப்பு மின்னழுத்தத்தின் இருமடிக்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதுடன், அதிர்வெண் அதிகரிக்க அதிகரிக்கவும் செய்கின்றது. எனவே ரேடியோ அதிர்வெண் நெடுக்கையில் ஆற்றல் இழப்பு அதிகமாகும்.

4.10 மின்கடத்தாப் பண்பின் முறிவு (Dielectric Breakdown)

புற மின்புலத்தில் ஒரு மின்கடத்தாப் பொருளை வைத்து புலச்செறிவை ஒரு மாறுநிலை வரை அதிகரிக்க அப்பொருள் மின்கடத்தியாக மாறுகின்றது.

எப்புலச் செறிவில் மின்கடத்தாப் பண்பின் முறிவு ஏற்படுகின்றதோ, அதை மின் கடத்தாப் பொருள் வலிமை (dielectric strength) என்பர். மின்கடத்தாப் பண்பின் முறிவு பல இயற்பியல் நடைமுறைகளினால் நிகழ்கின்றது. அவை

1) உள்ளார்ந்த (அல்லது) திடீர் சரிவு முறிவு
   Intrinsic (or) avalanche breakdown
2) வெப்பக்கிளர்ச்சி முறிவு (Thermal breakdown)
3) வேதிவினையால் முறிவு (chemical breakdown)
4) மின்னிறக்க முறிவு (discharge breakdown)
5) படிக வழுவால் முறிவு (defect breakdown)

மின்கடத்தாப் பொருள் மீது உயர் மின்புலம் செயல்படும் போது, இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் விடுபட்டுக் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குச் செல்லலாம். இதனால் உயரளவு மின்னோட்டம் ஊடகத்தில் விளைகின்றது. இதையே உள்ளார்ந்த அல்லது செனார் (Zener) முறிவு என்பர்.

கடத்து எலக்ட்ரான் முடுக்கப்பட்டுப் பிணைவுற்றிருக்கும் இணைதிற எலக்ட்ரானோடு மோதி, அதை விடுவித்து, கடத்து எலக்ட்ரானாக மாற்றுகின்றது. இந்த மாற்றம் ஒரு மாறுநிலையை எட்டும் வரை ஏற்படுவதில்லை. அதன் பின்னர் முறிவால் கடத்து எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மிகுந்தஅளவு அதிகரிக்கின்றது. அதனால் ஊடகம் பாதிக்கப்படுகின்றது. இது பொதுவாகத் தாழ்ந்த வெப்பநிலையிலும், உயர்மின் புலத்திலும் மெல்லிய தடிப்புள்ள மின்கடத்தாப் பொருளிலும், மிகக் குறுகிய கால இடைவெளியிலும் நடைபெறுகின்றது.

புறமின்புலத்தில் மின்கடத்தாப்பொருள் சூடாகும். அப்போது ஆற்றல் இழப்பு நிகழும். சில சூழல்களில் வெப்ப உற்பத்தி வெப்ப இழப்பைக் காட்டிலும் கூடுதலாக இருக்கும். இச்சூழ்நிலைகளில் உயர் வெப்பத்தால் மின்கடத்தாப் பொருளின் இயல்தன்மை பாதிக்கப்பட்டு, வெப்பமுறிவு ஏற்படலாம்.

மின்கடத்தாப் பொருளின் வெப்பநிலை அதிகரிக்கும்போது, அதிலுள்ள அயனிகளின் நகர்திறன் அதிகரிக்கின்றது. இதனால் ஊடகத்தில் மின்வேதியியல் வினைகள் தூண்டப்படுகின்றன. மின்தடை குறைவதால், மின்கடத்தாப் பொருள் மின்கடத்தும் திறனைப் பெறுகின்றது. இதை வேதிவினையால் முறிவு என்பர். இது தாழ்ந்த வெப்பநிலையிலும், புறமின்புலம் இல்லாத சூழ்நிலையிலும் கூட நிகழலாம். வெளிக்காற்றினால் இரப்பர் ஆக்ஸிஜனேற்றம் பெறுவதால், அது தன் மின்கடத்தாப் பொருள் பண்பைக் கொஞ்சம் கொஞ்சமாக இழக்கின்றது என்பதைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம். இந்த முறிவு பொருளிலுள்ள அயனிகளின் செறிவைப் பொறுத்திருக்கின்றது.

சில மின்கடத்தாப் பொருட்களில் வளிமக்குமிழிகள் உட்பகுதியில் உறைந்திருக்கலாம். புறமின்புலத்திற்கு உட்படுத்தும்போது, குமிழியிலுள்ள வளிமம் அயனிக்கப்பட்டு, அயனிகளால் உயரளவு மின்னோட்டத்தை ஏற்படுத்துகின்றது. இதை

மின்னிறக்கம் என்றும், முறிவை மின்னிறக்க முறிவு என்றும் கூறுவர். இது ஓரளவு தாழ்ந்த மின்னழுத்தத்தில் நிகழ்கின்றது. செயல்படும் மின்னழுத்தத்தின் அதிர்வெண்ணைப் பொறுத்திருக்கின்றது.

சில மின்கடத்தாப்பொருட்கள், வெடிப்பு, பிளவு, நுண்துளை, குமிழ் போன்ற குறைபாடுகளைக் கொண்டிருக்கலாம். இந்த வெற்று இடங்கள் ஈரப்பதமிக்க வேற்றுப்பொருளால் நிரப்பப்படலாம். அப்போது வழுவாலான முறிவு ஏற்படுகின்றது.

மின்கடத்தாப் பொருளில் முறிவு ஏற்படாமலிருக்க, அப்பொருள் கீழ்கண்ட பண்புகளைப் பெற்றிருக்க வேண்டும்.

1. உயரளவு மின்தடைத்திறன்
2. உயரளவு மின்கடத்தாப் பொருள் வலிமை
3. போதிய உறுதி
4. தாழ்ந்த மின்கடத்தாப் பொருள் ஆற்றல் இழப்பு
5. தாழ்ந்த வெப்பஞ்சார்ந்த பெருக்கம்
6. தீயினால் பெரிதும் பாதிக்கப்படாத தன்மை
7. எண்ணெய், நீர்மங்கள், வளிமங்களுக்கு அரிமானத்தடை.
8. ஓரளவு தாழ்ந்த அடர்த்தி
9. குறைபாடுகள் இல்லாது தூய்மையான நிலை

4.11 பெரோமின்மை
(Ferro electicity)

பெரும்பாலான பொருட்களின் அயனி மின்னேற்புத்திறன் வெப்ப நிலை மாற்றத்திற்கு உணர்திறன் கொண்டிருப்பதில்லை. ஆனால் ஒரு சிலவகைக்கு உட்பட்ட பொருட்களில், ஒரு திசை மின்புலத்திற்கு அதன் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி கீழ்க்கண்ட தொடர்புக்கு உட்பட்டு வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாற்றம் பெறுகின்றது. $T > T_c$ என்ற நிலையில்,

$$\varepsilon_r = B + C/(T-T_c)$$

T_c என்பது ஒரு மாறுநிலை வெப்பநிலை இதை கியூரிவெப்பநிலை என்பர். B,C என்பன வெப்பநிலை சாராத மாறிலிகளாகும். C-ஐ

கியூரி மாறிலி என்பர். $T < T_c$ என்ற நிலையில் மேற்குறிப்பிட்ட தொடர்பு இணக்கமாக இருப்பதில்லை. மாறாக எலக்ட்ரான் முனைவாக்கம் புறத்தூண்டுதலின்றி ஏற்படுகின்றது. எனவே T_c என்ற வெப்பநிலையில் பொருள் ஒரு நிலைமாற்றத்தைப் பெறுகின்றது எனலாம். T_c என்ற வெப்பநிலைக்கு மேல் பொருளிலுள்ள மின் இருமுனைகள் எல்லாம் தாறுமாறாகச் சிதறியவாறு திரும்பிப் பாராமின்மை நிலையில் இருக்கின்றன, ஆனால் T_c வெப்பநிலைக்குக் கீழ் மின்இருமுனைகள் ஒன்றோடொன்று இடைவினை புரிகின்றன. அதன் விளைவாக ஓர் அகப்புலம் உள்வெளியில் உருவாகி, மின் இருமுனைகளைத் தன்னிச்சையாக முனைவாக்கம் செய்கின்றது. இந்த முனைவாக்கம் வெப்பநிலை குறையக் குறையக் கூடுகின்றது.

B-ன் மதிப்பு $C / T\text{-}T_c$ உடன் ஒப்பிட மிகவும் குறைவு என்பதால் மேற்குறிப்பிட்ட தொடர்பை, மிகுந்த தோராயத்துடன்

$$\varepsilon_r = C / T - T_c$$

(4.13)-ன் படி

லாரன்ஸ் புலம் $E_{in} = P/3\epsilon_0 (\epsilon + 2\epsilon_0 / \epsilon - \epsilon_0)$. எனவே

தன்னிச்சையான முனைவாக்கம் $P = n\,\alpha\, E_{in}$

அல்லது

$$P / n\alpha = P / 3\varepsilon_0 (\varepsilon_r + 2 / \varepsilon_r - 1)$$
$$3(\varepsilon_r - 1) / \varepsilon_r + 2 = n\alpha / \varepsilon_0$$
$$\varepsilon_r = (1 + 2n\alpha / 3\epsilon_0) / (1 - n\alpha / 3\epsilon_0)$$

மின் இருமுனைகளின் முனைவாகுதிறன் $\alpha = \mu^2 / 3k_B T$ என்பதால்,

$$\epsilon_r = (T + 2 / 9\, n\mu^2 / k_B\epsilon_0) / (T - 1 / 9\, n\mu^2 / k_B\epsilon_0) = T + C / T - T_c$$

இதில் $C = 2n\mu^2 / 9k_B\epsilon_0$, $Tc = n\mu^2 / 9\, k_B\, \epsilon_0$

C-ஐ ஒப்பிட T தாழ்ந்த மதிப்புடையது எனக் கொண்டால்

$\epsilon_r = C / T - T_c$ என்றாகிறது.

எலக்ட்ரான் மற்றும் அயனி முனைவாக்கங்களின் பங்களிப்பைப் புறக்கணித்துவிட்டு இத்தொடர்பு வருவிக்கப்பட்டுள்ளது. இத்தொடர்பிலிருந்து $T \rightarrow Tc \; \epsilon_0 \rightarrow \infty$. இதன் விளைவாகப் பொருள் பெரோமின்மை நிலையை அடைகின்றது.

இந்தக் கொள்கை நீர் 1100K வெப்பநிலையில் பெரோமின்மை நிலையை அடையும் எனத் தெரிவிக்கின்றது. ஆனால் உண்மையில் அப்படிக் காணப்படவில்லை. எனவே இக்கொள்கை திருத்தம் செய்யப்பட வேண்டும் என்பதை இது சுட்டிக்காட்டுவதாக இருக்கின்றது.

வினாக்கள்

1. மின் முனைவாக்கம் என்றால் என்ன? அவற்றின் வகைகள் யாவை? இவை ஒவ்வொன்றும் எங்ஙனம் அதிர்வெண் சார்புடையதாக இருக்கின்றது?
2. மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலி, மின்னேற்புத்திறன் - குறிப்பு வரைக.
3. எலக்ட்ரான் முனைவாகுதிறன், அணு ஆரத்தின் மும்மடிக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது எனக்காட்டு.
4. அயனி முனைவாகுதிறன் மூலக்கூறின் சுருக்க நிறைக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கும் என்று நிறுவு
5. மின்முனைவாக்கத்தில் தளர்வு நேரம் என்றால் என்ன?
6. மின்கடத்தாப் பொருளின் உள்ளே அகப்புலத்திற்கான தொடர்பை வருவித்து, கிளாசியஸ் - மொசோட்டி சமன்பாட்டை நிறுவுக.
7. மூலக்கூறின் மின் இருமுனைத் திருப்புதிறனை அறியும் வழிமுறையை விளக்கிக் கூறுக.
8. முனைவு மூலக்கூறு, முனைவிலா மூலக்கூறு என்றால் என்ன? முனைவு மூலக்கூறுக்கான முனைவாக்கத்திற்குரிய லாஞ்சுலின்-டிபை சமன்பாட்டை வருவி.
9. ஆற்றலிழப்பு - மின் கடத்தாப்பொருள் மாறிலியின் இருகூறுகள் யாவை? அவற்றின் சிறப்பியல்புகள் என்ன?
10. அதிர்வெண் சார்ந்த எலக்ட்ரான் முனைவாகு திறனுக்கான கோவையை வருவித்து விளக்கு.
11. மின்கடத்தாப் பண்பின் முறிவு பற்றிக் குறிப்பு வரைக.

5. ஒளிர்வியல் பண்புகள்

படிகத்தில் உட்கவர் நிறமாலை – ஒளிமின் கடத்திக்கான மாதிரியமைப்பு - ஒளி உணர்திறன் - படிகப் பொறிகள் - எக்சைட்டான்

ஒளிர்தல் - உடனொளிர்வு – நின்றொளிர்வு – ஒளிர்மங்கள் - தாலியம் ஊட்டப்பட்ட கார ஹாலைடுகள்

5. ஒளிர்வியல் பண்புகள்

(Optical Phenomena)

5.1 அறிமுகம்

ஒரு சில படிகங்களின் மீது ஒளிக்கற்றையை விழச்செய்து அதன் மின்கடத்தும் திறனை அதிகரிக்க முடியும். இவ்வழிமுறையை ஒளிமின் கடத்து திறன் (photo conductivity) என்பர்.

படிகத்தின் ஆற்றல் இடைவெளியைவிட அதிகமான ஆற்றல் கொண்ட ஒளித்துகள்கள் படிகத்தால் உட்கிரகிக்கப்பட்டு, அதனுள் எலக்ட்ரான்-மின்துளைகள் ஜோடி ஜோடியாக உருவாகின்றன. அதனால் எலக்ட்ரான்கள் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து, கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குச் செல்கின்றன. அதன் விளைவாக இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில் மின்துளைகள் ஏற்படுகின்றன. எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் தனித்து இயங்கி, மின்கடத்தலுக்குத் துணைபுரிகின்றன. எலக்ட்ரான்-மின்துளை உருவாக்கத்திற்குத் தேவையான ஆற்றலைவிடக் குறைவான ஆற்றலை விழும் ஒளித்துகள் கொண்டிருக்குமானால், அது படிகத்திலுள்ள வேற்றுப் பொருளின் அணுக்களை அயனித்துத் தனித்து இயங்கவல்ல எலக்ட்ரான் அல்லது மின்துளையை வேற்றுப் பொருளின் தன்மைக்கு ஏற்ப உருவாக்குகின்றது.

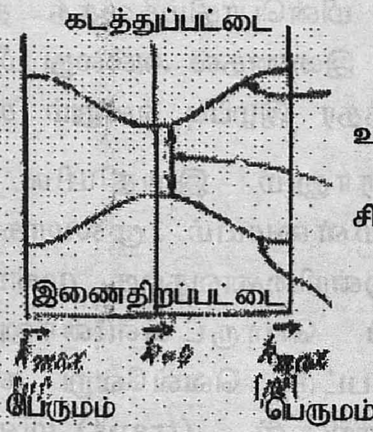
படிகத்தில் எலக்ட்ரானும், மின்துளையும் போட்டான் உட்கிரகிப்பால் உருவானால், அவை படிகத்திலுள்ள குறைபாட்டினால் உட்கவரப்படும் வரை, சுதந்திரமான இயக்கம் பெறுகின்றன. உட்கவர் மையங்கள் இருவகைப்படுகின்றன. உட்கவரப்பட்ட மின்பொதிமம், படிக வழுவில் அதற்கு எதிரான மின்னூட்டம் கொண்ட மின்பொதிமத்தோடு ஒன்றிணைந்திருப்பதை விட, வெப்பஆற்றலால் கிளர்வுற்று, மீண்டும் தனி இயக்க நிலைக்கு விடுவிக்கப்படுவதற்கு அதிக வாய்ப்புப் பெற்றிருக்கலாம். அப்போது உட்கவர் மையத்தைப் பொறி அல்லது கண்ணி மையம் (trapping centre) என்பர். அப்படியின்றி உட்கவரப்படுவதோடும் நின்றுவிடலாம். அப்போது உட்கவர் மையத்தை மீள்சேர் மையம் (recombination centre) என்பர்.

பொறியால் பிடித்தல் என்பது மின்பொதிமத்தைத் தற்காலிகமாக நீக்குதல் என்றும், புனரமைப்பில் இணைதல் அல்லது மீள இணைதல் என்பது மின்பொதிமத்தின் நிரந்தர இழப்பு என்றும் கூறலாம்.

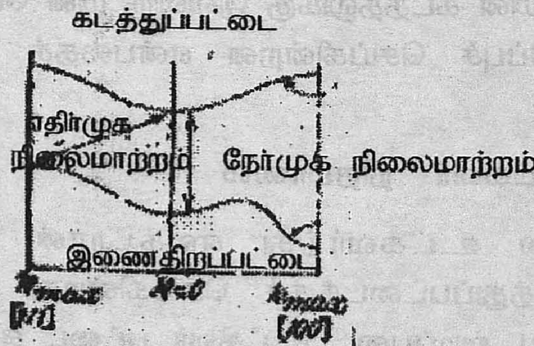
மின்துளையும் எலக்ட்ரானும் இறுதியில் நேரடியாக இணைவதாலோ, அல்லது மீள்மையம் மூலமாகவோ ஒன்று கூடுகின்றன என்றும் அப்படி ஒன்றிணைவதற்கு முன்பு, ஒவ்வொரு மின்பொதிமமும், வேற்றுப் பொருட்களினாலும், படிகக் குறைபாடுகளினாலும் சிறைப்பட்டு, வெவ்வேறு காலங்களைக் கழிக்கின்றது. படிகப் பொறிகள், (traps) மின்துளைகள், எலக்ட்ரான்கள் மீது வெவ்வேறு அளவில் தாக்கத்தை ஏற்படுத்துவதால், ஒளிமின் கடத்தலுக்கு இவ்விரு மின் பொதிமங்களும் எந்த அளவு பங்களிப்புச் செய்கின்றன என்பதைத் தீர்மானிப்பது கடினமாக உள்ளது.

5.2 படிகத்தில் உட்கவர் நிறமாலை

ஒளிஆற்றலை உட்கவர்ந்து எலக்ட்ரான் இணைதிறப் பட்டையிலிருந்து கடத்துப்பட்டைக்குச் செல்கின்றது. படிகத்தின் உட்கவர்நிறமாலையை அடிப்படை உட்கவர் பட்டை என்றும், உயர் அலைநீளப் பக்கத்தில் அப்பட்டையின் வரப்பெல்லையை உட்கவர் விளிம்பு என்றும் கூறுவர். எலக்ட்ரான், போட்டானுடன் மோதித் தன் நிலையை மாற்றிக்கொள்ளும்போது, அவற்றின் ஆற்றல், மற்றும் அலைவெக்டார் k இரண்டும் மாறாக்கோட்பாட்டுக் கொள்கைக்கு உட்படுகின்றன. எலக்ட்ரானின் அலைவெக்டார் மாற்றத்தோடு ஒப்பிட, போட்டானின் அலைவெக்டார் மாற்றம் மிகவும் புறக்கணிக்கத்தக்க வகையில் நுண்ணளவானது. எனவே எலக்ட்ரான் - போட்டான் மோதலினால் எலக்ட்ரான் தன் அலைவெக்டாரில் பெறும் மாற்றமும் புறக்கணிக்கத்தக்கது. எனவே ஒரு k மதிப்புடைய ஆனால் வெவ்வேறு ஆற்றல்பட்டைக்கு உட்பட்ட இருநிலைகளுக்கிடையே நிலைமாற்றம் ஏற்படும் எனலாம். k ஐ மாற்றத்திற்கு உட்படுத்தும் எந்த நிலைமாற்றமும் தேர்வு செய்யப்படுவதில்லை. ஒளி உட்கவர் நிறமாலையில் முக்கியமான தேர்வு விதி $\Delta k=0$ உட்கவர் விளிம்பிற்கு ஒத்த ஆற்றல் வேறுபாடு ஒரே k மதிப்புடைய, ஒரு நிலை கடத்துப்பட்டையிலும், மற்றொரு நிலை இணைதிறப் பட்டையிலும் இரு நிலைகளுக்கிடையே உள்ள சிறும ஆற்றல் மதிப்பாகும்.



(அ) NaCl



(ஆ) AgCl

படம் 5.1 அயனிப் படிகத்தில் ஆற்றல் பட்டையின் கட்டமைப்பு

படம் 5.1(அ)ல் சாதாரணமான அயனிப் படிகத்தின் (NaCl) ஆற்றல் பட்டையும், உட்கவர் விளிம்பும் காட்டப்பட்டுள்ளன. அயனிப் படிகங்கள் மின்னேமங்களாக (insulator) இருப்பதால், அதன் ஆற்றல் பட்டையமைப்பில், முழுநிறைவான இணைதிறப்பட்டையும், முழு வெறுமையான கடத்துப்பட்டையும், அவைகளுக்கிடையே ஒரு குறிப்பிட்ட ஆற்றல் இடைவெளியுடன் கூடிய தவிர்க்கப்பட்ட பட்டையும் உள்ளன. இணைதிற ஆற்றல் பட்டையின் பெருமமும், கடத்து ஆற்றல் பட்டையின் சிறுமமும் k=0 என்ற அமைவிடத்தில் தோன்றியிருக்கின்றன. நேர்குத்தாக நிகழும் நிலைமாற்றத்தை நேர்முக நிலைமாற்றம் என்றும் கூறுவர். இது தேர்வுவிதிக்கு ஏற்ப நிகழக்கூடியதாக இருக்கின்றது.

படம் 5.1(ஆ)ல் AgCl படிகத்தின் ஆற்றல் பட்டையின் அமைப்பு காட்டப்பட்டுள்ளது. இது NaCl –ன் ஆற்றல் பட்டையின் அமைப்பிலிருந்து வேறுபட்டிருக்கின்றது. இதில் கடத்து ஆற்றல் பட்டையின் சிறுமமும், இணைதிற ஆற்றல் பட்டையின் பெருமமும் வெவ்வேறு k மதிப்புகளில் அமைந்துள்ளன. இதில் நேர்முக நிலைமாற்றம் ($\Delta k=0$), k=0 அமைவிடத்தில் நிகழ்கின்றது. எதிர்முக நிலைமாற்றமும் $\Delta k\neq0$ நிகழ்வதற்கான வாய்ப்பும் காணப்படுகின்றது. இந்த நிலைமாற்றம் இணைதிற ஆற்றல் பட்டையில் k=0 என்றில்லாது பிற k மதிப்புடைய அமைவிடங்களிலிருந்து, கடத்து ஆற்றல் பட்டையில் k=0 மதிப்புடைய அமைவிடத்திற்கு ஏற்படுவதாகும். இதில் ஒரு போட்டானும் ஒரு போனானும் ஆக இரண்டும், உட்கவரப்படுகின்றன, அல்லது ஒரு போட்டான் உட்கவரப்பட்டு ஒரு போனான் உமிழப்படுகின்றது. படிகத்தில் உந்தத்தை மாறாக் கோட்பாட்டிற்கு உட்படுத்த, இந்தப் போனான் உட்கவர்தல் அல்லது உமிழ்தல் அவசியமாகும்.

5.3 ஒளிமின் கடத்திக்கான எளியமாதிரி (Simple model of a photo conductor)

ஓர் அயனிப் படிகத்தில் ஒளிக்கற்றை விழ, எலக்ட்ரான்-மின்துளை ஜோடிகள், அதன் பருமன் முழுவதிலும் ஒரு சீராக உற்பத்தியாகின்றன எனக் கருதலாம். மீள் - சேர் வழிமுறையில் எலக்ட்ரானும் மின் துளையும் நேரடியாக ஒன்றிணைகின்றன. மேலும் ஒரு மின்வாயின்மூலம் படிகத்திலிருந்து வெளியேறும் எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும், எதிர்மின் வாயின்மூலம் படிகத்தினுள் பாயும் எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கையும் சமம் எனவும் கொள்ளப்பட்டள்ளது. மின்துளையின் நகர்திறன், எலக்ட்ரானின் நகர்திறனோடு ஒப்பிட மிகவும் குறைவு என்பதால், அதைப் புறக்கணிக்கலாம்.

படிகத்தில் எலக்ட்ரான் செறிவை n என்றும் அதில் ஏற்படும் மாறுபாட்டு வீதத்தை dn/dt என்றும் குறிப்பிடுவோம்.

$$\frac{dn}{dt} = L - Anp = L-An^2 \qquad (5.1)$$

இதில் L என்பது ஓரலகு பருமனில் ஓரலகு நேரத்தில் படிகத்தால் உட்கவரப்படும் போட்டான்களின் எண்ணிக்கையாகும். அதாவது ஒளிச்செறிவாகும். Anp என்பது மீள்-சேர் வீதமாகும். இது எலக்ட்ரான், மின்துளைகளின் செறிவின் பெருக்கல் பலனுக்கு நேர்விகிதத்தில் இருக்கின்றது. A என்பது மீள்-சேர் குணகமாகும். n=p என்பதால் $np=n^2$ எனக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. நிலையான நிலையில்

$$\frac{dn}{dt} = 0$$

எனவே $L-An^2 = 0$ அல்லது $n_0 = (L/A)^{1/2}$ (5.2)

இதில் n_0 என்பது நிலையான நிலையில் எலக்ட்ரான் செறிவாகும். இதிலிருந்து மின்கடத்துதிறனை மதிப்பிடலாம்.

$$\sigma=n_0 e\mu$$

$$=\left(\frac{L}{A}\right)^{1/2} e\mu \qquad (5.3)$$

இதில் μ என்பது எலக்ட்ரானின் நகர்திறனாகும். ஒளிமின்னோட்டத்தின் அடர்த்தியை

$$I=\sigma E=\left(\frac{L}{A}\right)^{1/2} e\mu \frac{V}{d} \qquad (5.4)$$

இங்கு d என்ற தடிப்புள்ள படிக மாதிரிக்குக் குறுக்கே V என்ற மின்னழுத்தம் செயல்படுகின்றது எனக் கொள்ளப்பட்டுள்ளது. தொடர்பு (5.2) ஒளிமின்னோட்டம் $(L)^{1/2}$ க்கு ஏற்ப இருப்பதைத் தெரிவிக்கின்றது. ஆனால் நடைமுறையில் L-ன் மடியெண் 1/2க்கும் 1க்கும் இடையே உள்ளது, சில சமயங்களில் 1 ஐ விடக் கூடுதலாக இருப்பதுமுண்டு.

ஒளிமின் எலக்ட்ரான்களின் சிதைவு அல்லது ஒளிமின் கடத்துதிறனின் இழப்பு, வீசும் ஒளிக்கற்றையைத் தடுத்து நிறுத்தியவுடன் தொடங்குகின்றது. L=0 எனில்

$$\frac{dn}{dt} = -An^2$$

இதன் தீர்வு

$$\frac{1}{n} = At + \frac{1}{n_o}$$

n_0 என்பது வீசும் ஒளியை நிறுத்தியவுடன் t=0 என்றபோது எலக்ட்ரானின் செறிவாகும்.

$$n = \frac{n_o}{1+At\, n_o} \quad (5.4)$$

எலக்ட்ரான் செறிவு $\frac{1}{2} n_0$ ஆகக் குறைவதற்கு எடுத்துக்கொள்ளும் காலத்தை இதைக் கொண்டு எளிதாக மதிப்பிட்டறியலாம்.

$$\tau = \frac{1}{A\, n_o} \text{ எனில் } n = n_o/2$$

சமன்பாடு (5.2)ஐக் கொண்டு Aன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்ய

$$\tau = \frac{1}{A\, n_o} = (LA)^{-1/2} = n_o/L \quad (5.5)$$

சமன்பாடு (11.3)ஐக் கொண்டு

$$\tau = \frac{\sigma}{Le\mu} \quad (5.6)$$

τ என்பது எதிரிடைச் செயல்நேரம் (response time) எனப்படும். இது கொடுக்கப்பட்ட ஒளிச்செறிவிற்கு, ஒளிமின் கடத்துதிறனுக்கு

நேர்விகிதத் தொடர்பில் இருக்கின்றது. ஒளிக்கு உணர்வு நுட்பமிக்க ஒளிமின் கடத்திகளின் எதிரிடைச் செயல்நேரம் மிகவும் அதிகமாயிருக்கும். காட்மியம் சல்பைடில் இந்த நேரம் பல வினாடிகள் நெடுக்கையில் இருப்பது அறியப்பட்டது.

ஒளிஉணர்திறன் (Photo sensitivity)

ஓர் ஒளிமின் கடத்தியின் ஒளி உணர்திறன் அல்லது ஆதாயக்காரணி (gain factor) G என்பது, படிகத்தைக் கடந்து செல்லும் மின்பொதிமங்களின் எண்ணிக்கைக்கும், படிகத்தால் உட்கிரகிக்கப்பட்ட போட்டான்களின் எண்ணிக்கைக்கும் உள்ள தகவாகும். படிகத்தின் தடிப்பு ϕ என்றும், அதன் குறுக்குப்பரப்பு ஓரலகு என்றும் கொண்டு Gயை மதிப்பிட்டால்

$$\tau = \frac{I/e}{Ld} = \frac{(L/A)^{1/2}\mu\, V/d}{Ld}$$

$$= \frac{V\mu}{d^2(LA)^{1/2}} \qquad (5.7)$$

நிலையான நிலையில் எலக்ட்ரான் மின்னோட்ட அடர்த்தியை

$$I = n_o eV$$

எனக் குறிப்பிடலாம். இதில் V என்பது எலக்ட்ரானின் சராசரி இயக்க வேகமாகும். இதன் மதிப்பை

$$V = \frac{I}{n_o e} = \frac{\sigma E}{n_o e} = \mu E = \mu \frac{V}{d} \qquad (5.8)$$

மின் பொதிமம் (எலக்ட்ரான் அல்லது மின்துளை), படிகத்தில் இருமின்வாய்களுக்கிடைப்பட்ட தொலைவு dயைக் கடக்க எடுத்துக்கொள்ளும் நேரம், ஊடுசெல்கை (transit) நேரம் எனப்படும். இதை T_d எனக் குறிப்பிட்டால்

$$T_d = \frac{d}{v} = \frac{d^2}{\mu v} \quad (5.9)$$

சமன்பாடு (5.5)ன் துணைக்கொண்டு, மீள்-சேர்தலுக்கு முன்பு எலக்ட்ரானின் வாழ்வுக்காலத்தை மதிப்பிடலாம். இது நிலையான நிலையில் எதிரிடைச்செயல் நேரத்திற்குச் சமமாயிருக்கின்றது.

$$T_e = \tau = (LA)^{-1/2} \quad (5.10)$$

சமன்பாடு (5.7)லிருந்து $G = T_e/T_d$ என அறிய முடிகின்றது. (5.12)

இதனடிப்படையில் Gயின் மதிப்பைக் கணக்கிட்டபோது, அது சோதனை முடிவுகளால் பெறப்பட்ட மதிப்பை விட மிகவும் கூடுதலாக இருப்பது அறியப்பட்டது. இது இந்த மாதிரியமைப்பின் இயலாமையைச் சுட்டிக்காட்டுகின்றது. திருத்தியமைக்கப்பட்ட மாதிரியில் படிகப்பொறிகளின் (traps) தாக்கம் கவனத்தில் கொள்ளப்பட்டது.

மின்பொதிமங்களின் வாழ்வுக்கால வகைகள்

ஒரு மின்பொதிமத்திற்கு மூன்றுவகையான வாழ்வுக்காலங்கள் வரையறுக்கப்பட்டுள்ளன. அவை பின்வருமாறு

தனிஇயக்க வாழ்வுக் காலம் (Free life time)

இது மின்கடத்தலுக்குப் பங்களிப்புச் செய்யுமாறு மின்பொதிமம் பெற்றிருக்கும் இயக்க வாழ்வுக் காலமாகும். அதாவது கிளர்ச்சியுற்ற எலக்ட்ரான் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையில், அல்லது கிளர்ச்சியுற்ற மின்துளை இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டையில் இருக்கும் காலம் இதுவாகும்.

கிளர்ச்சிநிலை வாழ்வுக்காலம் (Excited life time)

கிளர்ச்சி தூண்டப்படும் செயலிலிருந்து, மீள்-சேர்தல் செயல்வரைக்கும் இடைப்பட்ட மொத்தக் காலம் இதுவாகும். படிகப் பொறியில் மின்பொதிமம் இடம்பெறும் காலமும் இதிலடங்குவதால், இது பொதுவாகத் தனி இயக்க வாழ்வுக்காலத்தை விட மிகவும் அதிகமாகும்.

ஜோடி வாழ்வுக்காலம் (Pair life time)

இது ஒரு எலக்ட்ரான் மின் துளையின் வாழ்வுக்காலமாகும். இதில் எலக்ட்ரானோ அல்லது மின்துளையோ சிறைப்பிடிக்கப்படுமானால், ஜோடி வாழ்வுக் காலம் முடிவுக்கு வருகின்றது.

5.4 படிகப்பொறிகள் (Traps)

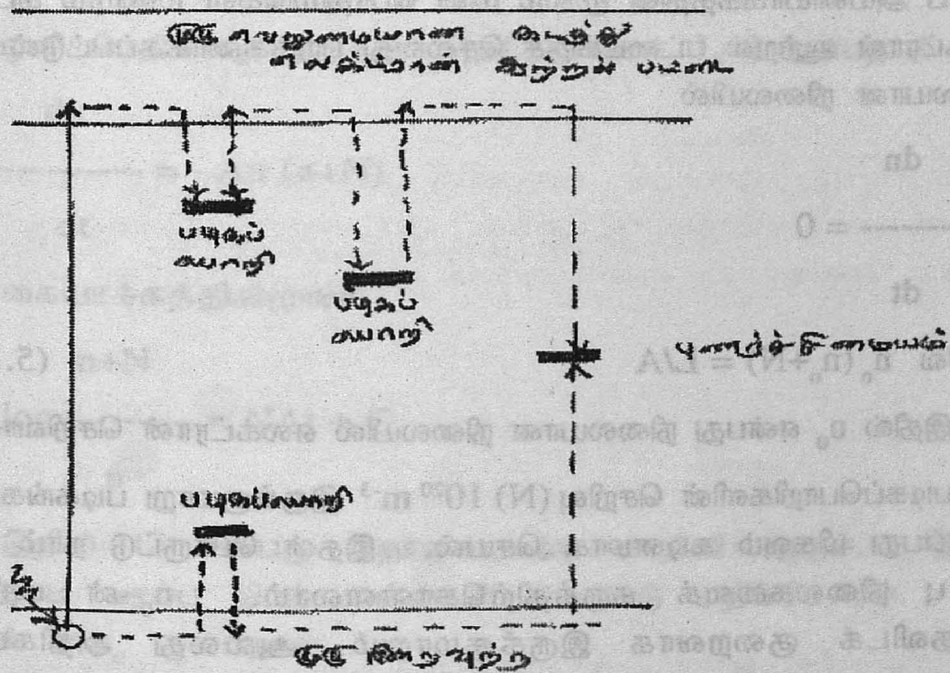
படிகப்பொறி என்பது படிகத்தில் இருக்கின்ற ஒரு வேற்றுப்பொருள் அல்லது வழுவாகும். இது ஓர் எலக்ட்ரானையோ அல்லது மின் துளையையோ விழுங்கக் கூடியதாக இருப்பதால் இதைப் படிகப் பொறி என்றழைக்கின்றனர். தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல் பட்டையில் இருக்கின்ற ஆற்றல் மட்டம், எலக்ட்ரானையோ அல்லது மின்துளையையோ சிறைப்படுவதற்கு அனுகூலமாயிருந்தால் அதை படிகப்பொறி எனலாம். சிறைப்பட்ட மின்பொதிமம் சிறிது நேரத்திற்குப்பிறகு தன்னை விடுவித்துக்கொண்டு மீண்டும் தனித்து இயங்கலாம். இது மீள்-சேர்தல் அல்லது மற்றொரு படிகப் பொறியால் சிறைப்பிடிக்கப்படும் வரை தனித்து இயங்கக்கூடியதாகவோ இருக்கின்றது.

படிகப்பொறி வகைகள்

படிகப்பொறிகளில் இருவகைகள் உள்ளன. ஒரு வகையான படிகப்பொறி எலக்ட்ரானும் மின்துளையும் மீள இணையத் துணைபுரிந்து வெப்பச் சமநிலையை மீட்கின்றது. இந்த வகைப் படிகப் பொறிகளையே மீள் மையம் என்பர். மற்றொரு வகையான படிகப்பொறி, மீள இணைதலுக்கு நேரடியாகத் துணை புரிவதில்லை. ஆனால் இருவகை மின் பொதிமத்தில் ஒரு வகை மின்பொதிமத்தின் தனி இயக்கத்தைப் பாதித்து முடக்கிவிடுகின்றது.

முதல்வகைப் படிகப்பொறியினால் எலக்ட்ரான் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து, இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டைக்கு எடுத்துச் செல்லப்படுகின்றது. ஒரு மின்துளை சிறைப்பிடிக்கப்பட்ட எலக்ட்ரானைக் கொண்டுள்ள படிகப்பொறிக்கு அருகாமையில் இருக்கும்போது இதற்கான வாய்ப்பு ஏற்படுகின்றது. இதனால் எலக்ட்ரான்-மின்துளை ஜோடி இழக்கப்படுகின்றது. இந்த வழிமுறையில் சிறிய அளவில்கூட ஒளி ஆற்றல் உமிழப்படுவதில்லை.

சிறைமையம் அணித்தளங்களுடன் இறுக்கமாகப் பிணைந்திருப்பதால், எலக்ட்ரான் அல்லது மின்துளையுடன் தொடக்கத்தில் இருந்த ஆற்றலும், உந்தமும், அணித்தள அதிர்வாக மாற்றப்படுகின்றன. கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டையிலிருந்து படிகப் பொறியால் எலக்ட்ரான் உட்கவரப்படுதல், படிகப்பொறியிலிருந்து, கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு எலக்ட்ரான் உமிழப்படுதல், எலக்ட்ரான் கொண்ட படிகப் பொறியால் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து மின் துளை உட்கவரப்படுதல், இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலிருந்து வெறுமையான படிகப்பொறிக்குத் தாவுதல் போன்றவை இதில் நடைபெறும், அடிப்படை வழிமுறையாகும். கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து படிகப்பொறிகளால் எலக்ட்ரான்கள் உட்கவரப்படும்விகிதம், அப்பட்டையிலுள்ள எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை மற்றும் வெறுமையான படிகப்பொறிகளின் எண்ணிக்கைக்கு நேர்விகிதத்திலிருக்கின்றது.



முனைநீள எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டை

படம் 5.2 படிகப்பொறியும், எலக்ட்ரான்-மின்துளை மீள இணைதலும்

மற்றொரு வகையான படிகப் பொறி மீள் சேர்தல் வழிமுறைக்கு நேரடியாகத் துணைபுரியாவிட்டாலும், எலக்ட்ரான் அல்லது

மின்துளைகளின் தனித்த இயக்கத்தை மட்டுப்படுத்துகின்றது. ஒரு படிகத்தில் ஓரலகுப் பருமனில் N எலக்ட்ரான் உட்கவர் படிகப் பொறிகள் இருப்பதாகக் கருதுவோம். அயனியாக்க ஆற்றலை ஒப்பிட, வெப்பநிலை மிகக்குறைவாக இருப்பதால், வெப்ப இயக்க மின் பொதிமங்களின் செறிவை நாம் புறக்கணிக்கலாம். மீள்-சேர் குணகம் Aன் மதிப்பு, எலக்ட்ரான்-மின்துளை புணர்ச்சி, மற்றும் எலக்ட்ரான் சிறைப்பிடிப்பு ஆகிய இரு வழிமுறைகளுக்கும் சமமானது எனக்கொண்டால், எலக்ட்ரான் செறிவில் ஏற்படும் மாறுபாட்டுவீதம்

$$\frac{dn}{dt} = L - A(n+N)n$$ ஆகும்.

இதில் n என்பது கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டையில் உள்ள எலக்ட்ரான் செறிவாகும். இத்தொடர்பில் படிகப் பொறியிலிருந்து வெப்ப அயனியாக்கத்தின் மூலம் மின் பொதிமங்கள் மீண்டும் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குச் செல்வது புறக்கணிக்கப்பட்டுள்ளது. நிலையான நிலையில்

$$\frac{dn}{dt} = 0$$

எனவே $n_o(n_o+N) = L/A$ (5.13)

இதில் n_0 என்பது நிலையான நிலையில் எலக்ட்ரான் செறிவாகும்.

படிகப்பொறிகளின் செறிவு (N) 10^{20} m^{-3} இருக்குமாறு படிகங்களை வளர்ப்பது மிகவும் கடினமாக செயல். இதன் பொருட்டு நாம் இரு வரம்பு நிலைகளைக் கருத்திற்கொள்ளலாம். n_0–ன் மதிப்பு இதைவிடக் குறைவாக இருக்குமாறும், அல்லது அதிகமாக இருக்குமாறும் இருநிலைகளை எடுத்துக்கொள்ளலாம். உண்மையில் தாழ்ந்த ஒளிச்செறிவு உள்ள நிலையிலும், உயர்ஒளிச்செறிவு உள்ள நிலையிலும் முறையே இப்படி இருக்கின்றன எனலாம்.

தாழ்ந்த n_0 மதிப்பு $n_0 << N$ என்ற நிபந்தனையை ஏற்படுத்துவதால் Nனோடு ஒப்பிட n_0 ஐப் புறக்கணிக்கலாம்.

$n_o N = L/A$

$n_o = L/AN$

எனவே ஒளி மின்னோட்டத்தின் அடர்த்தி

$$I = n_o e\mu \frac{V}{d} = \frac{L}{AN} e\mu \frac{V}{d} \qquad (5.14)$$

இத்தொடர்பு ஒளி மின்னோட்டத்தின் அடர்த்தி, ஒளிச்செறிவிற்கு நேர்விகிதத் தொடர்பில் இருப்பதாகத் தெரிவிக்கின்றது.

ஒளிச்செறிவு அதிகமாக இருக்கும்போது $n_0 >> N$ எனவே (5.13)லிருந்து

$n_o N = (L/A)^{1/2}$

இது (5.2) சமன்பாட்டையே தருகின்றது.

ஒளிச்செறிவைத் தடுத்து நிறுத்தியவுடன் L=0 என்பதால்

$$\frac{dn}{dt} = - An(n+N)$$

தொகையாக்கத்தின்மூலம்

$$\log \frac{n+N}{n} = NAt + C$$

இதில் C என்பது தொகையாக்க மாறிலி ஆகும். இதன் மதிப்பை வரம்பு நிபந்தனையைக் கொண்டு மதிப்பிடலாம். t=0 எனில் $n=n_0$ என்பதால்

$$\log \frac{n+N}{n} = NAt + \log \frac{n_o+N}{n_o}$$

ஒளிச்செறிவு சுழியான பின்பு $N>>n_0$ என்பதால் தோராயத்தின் மூலம்

$$\log \frac{N}{n} - \log \frac{N}{n_o} = NAt$$

$$\log n/n_o = -NAt$$

$$n = n_o e^{-NAt}$$

$t=t_o = 1/NA$ எனில்,

$$n = n_o e^{-1}$$

எனவே படிகப் பொறிகள் தோன்றியிருக்கும்போது, எதிரிடைச் செயல் நேரம், படிகப்பொறி இல்லாத நிலையில் இருப்பதைவிட மாறுபட்டிருக்கின்றது. இங்கு நிலையான நிலையில் உள்ள மின்பொதிமத்தின் செறிவு e^{-1} மடங்கு தாழ்வுற எடுத்துக் கொள்ளும் காலம் எதிரிடைச் செயல் நேரம் எனப்படுகின்றது.

படிகத்தின் மின்கடத்து திறன்

$\sigma = n_o e\mu$

$= L e\mu/AN$ (5.16)

இத்தொடர்பு, படிகத்தில் பொறிகள் இருக்கும்போது, அதன் மின்கடத்து திறன் குறைகின்றது எனத் தெரிவிக்கின்றது.

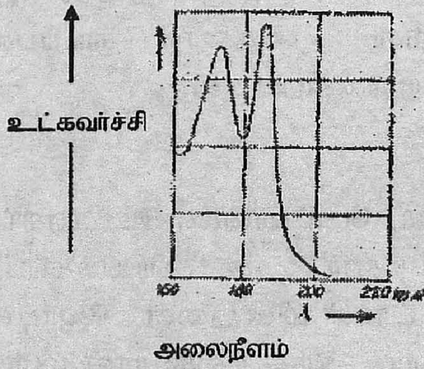
படிகத்தின் முழுப் பருமனிலும் ஒரே சீராக ஒளி விழாவிட்டால், ஒளிமின்கடத்தியின் வெளியில் மின்னூட்டத் தேக்கம் ஏற்படுகின்றது. மின்வாய்கள் படிகத்திற்கு மின்பொதிமங்களை எவ்விதத் தடங்கலுமின்றி ஊட்டமுடியாவிட்டாலும் இந்நிலை தூண்டப்படுகின்றது. இவை ஒளிமின்னோட்டத்தைத் தீவிரமாகப் பாதிக்கின்றன. புறப்பரப்பு மின்னூட்டங்களிளாலான மின்புலம், மின்வாய்கள் மூலம் செயல்படுத்தப்படும் புறமின்புலத்தைச் சமன் செய்ய இறுதியில் மின்னோட்டம் நிறுத்தப்படவும் வாய்ப்பிருக்கின்றது.

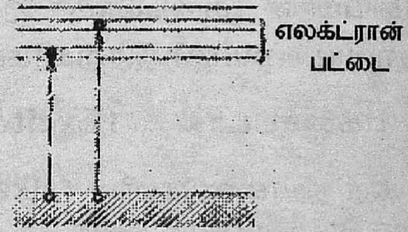
ஒளிமின்னோட்டத்தை அளவிட்டறியும் வழிமுறையில் இது முக்கியமான தடையாக இருக்கின்றது. அதனால் துடிப்பலை முறையை (pulse) இதற்காகப் பின்பற்றுகின்றார்கள்.

5.5 எக்சைட்டான் (Exciton)

கார ஹாலைடுகளில் (alkali halides) போட்டான்கள் உட்கிரகிப்புப் பற்றி பிரைன்கெல் விரிவாக ஆராய்ந்தார். உட்கிரகிக்கப்படும் ஒவ்வொரு போட்டானும் ஓர் எலக்ட்ரான்-மின்துளை ஜோடியை உருவாக்குகின்றது என இவர் கற்பித்தார். இந்த எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலுள்ள குவாண்டம் நிலைக்கு நிலைமாறுவதில்லை மாறாக, மின்துளை இருக்கும் வட்டாரத்திலேயே இருக்கின்றது. அதாவது எலக்ட்ரான்-மின்துளை தனிப்பட்டுத் தனித்து இயங்காமல் ஒன்றிணைந்து ஒரு நிலையான கட்டமைப்புடன் படிகத்தில் நிலைப்படுகின்றன. இத்தகைய எலக்ட்ரான்-மின்துளை ஜோடியை எக்சைட்டான் என்பர். நாம் இதைக் கிளர்மம் எனக் குறிப்பிடலாம் (போட்டானின் ஆற்றல், ஆற்றலிடைவெளியைவிட அதிகமாக இருக்குமானால் எலக்ட்ரான்-மின்துளை இணைப்பு விடுபட்டுத் தனித்தியங்க ஒளிமின்னோட்டம் ஏற்படும்).

கார ஹாலைடுகளின் உட்கவர் நிறமாலையில் பல உட்கவர்முகடுகள் காணப்படுகின்றன. அவற்றைத் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் எளிதாகப் பகுத்து இனமறிய முடிகின்றது. இந்த முகட்டுப் பகுதியில் உட்கவர் குணகம் அதிகமாக இருக்கின்றது. ஒளி இந்த முகட்டுப் பகுதியில் உட்கிரகிக்கப்படும்போது (முதல் முகடு, அல்லது உட்கவர் விளிம்பு), ஒளி மின்னோட்டம் இருப்பதில்லை.





(அ) உட்கவர் நிறமாலை (ஆ) எக்சைட்டான் பட்டை

படம். 5.3 உட்கவர் நிறமாலையின் பொதுத் தோற்றமும் எக்சைட்டான் பட்டையும்

உயர்அலைநீள நெடுக்கையில் ஒளி உட்கவரப்படும்போது, படிகம் மின்கடத்துதிறனில் மாற்றமேதும் காட்டாததால், முதல் உட்கவர் முகடு, நிறைவுற்ற பட்டையிலிருந்து கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்கு நிலைமாற்றத்தைத் தூண்டுவதில்லை என்று நாம் முடிவு செய்யலாம். மாறாக ஹாலஜென் அயனிகளில் கிளர்ச்சி நிலைகளை ஏற்படுத்துகின்றது. அதாவது நிறைவுற்ற பட்டையிலிருந்து, கடத்து எலக்ட்ரான் பட்டைக்குச் சற்றுக் கீழே உள்ள ஆற்றல் நிலைக்கு நிலைமாற்றம் செய்கின்றது. இது கிளர்ச்சியுற்ற நிலையேயானாலும், இந்த எலக்ட்ரான், கடத்து எலக்ட்ரானைப் போலத் தனித்து இயங்கவல்லதல்ல. இது ஏற்படுத்திய மின்துளையோடு கூலும் விசையால் இடைவினை புரிவதால், கட்டுண்டிருப்பதே இதற்குக் காரணம். கிளர்ச்சி நிலையில் எலக்ட்ரானும், அதனுடன் தொடர்புடைய மின்துளையும் இணைந்திருக்கும் நிலைமை எக்சைட்டான் என்பர்.

எக்சைட்டான் ஹைட்ரஜன் அணுபோல எதிர் எதிரான மின்னூட்டங்கொண்ட இரு துகள்களின் கட்டுண்ட நிலையைக் கொண்டிருக்கின்றது. இதன் மொத்த மின்னூட்டம் சுழியென்பதால் இது மின் நடுநிலையில் உள்ளது எனலாம். அதனால் இது மின் கடத்தலுக்குச் சிறிதும் பங்களிப்புச் செய்வதில்லை. கட்டுண்ட நிலையில் இதன் ஆற்றல், தனித்திருக்கும் நிலையில் இருப்பதைவிடக் குறைவாக இருப்பதால், இதன் நிலை, தவிர்க்கப்பட்ட ஆற்றல்

பட்டையில் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டைக்குச் சிறிது கீழே அமைந்துள்ளது.

ஹாலைடு அயனியின் வட்டாரத்தில் எக்சைட்டான் உருவானவுடன், கிளர்ச்சியுற்ற ஹாலைடு அயனி தனக்கு அடுத்துள்ள ஹாலைடு அயனிக்கு ஆற்றலைப் பரிமாற்றம் செய்கின்றது. இதன் மூலம் படிக அணித்தளத்தில் எக்சைட்டான் ஊடுபரவுகின்றது. எக்சைட்டான் மாதிரியமைப்பிற்கு இருவேறு வரம்பு நிலைகள் தெரிவிக்கப்பட்டுள்ளன. முதலாவது மோட் மற்றும் வான்நியரால் கற்பிக்கப்பட்ட பலவீனமாய் பிணைவுற்ற எக்சைட்டான். இரண்டாவது பிரென்கெல் என்பாரால் கற்பிக்கப்பட்ட உறுதியாய் பிணைவுற்ற எக்சைட்டான் ஆகும்.

பலவீனமாய்ப் பிணைவுற்ற எக்சைட்டான்

இது சற்றேறக்குறைய ஹைட்ரஜன் அணு, இன்னும் சரியாகச் சொல்லப்போனால் பாசிட்ரோனியம் போன்றது. ஹைட்ரஜன் அணுபோல எக்சைட்டானும் பல குவாண்டம் ஆற்றல் நிலைகளைப் பெற்றுள்ளது. போர் அணு மாதிரியமைப்பின்படி எக்சைட்டானின் ஆற்றல்

$$E_n = \frac{-\mu e^4}{2\hbar^2(\varepsilon_o{}^2 n^2)} \quad (\hbar = h/2\pi)$$

இதில் n என்பது முதன்மைக் குவாண்டம் எண், μ என்பது சுருக்க நிறையாகும். இந்த ஆற்றல் நிலைகளுக்கிடையே நிலை மாற்றம் ஏற்பட வாய்ப்புண்டு என்றாலும் இதை நேரடியாக இனமறிந்து கொள்வது மிகவும் கடினமாகும். இதற்குக் காரணம் தேவைப்படும் உயர்செறிவுடன் கூடிய எக்சைட்டான்களை உற்பத்தி செய்வது இயலாததாக இருக்கின்றது. எனினும் இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து எக்சைட்டான் ஆற்றல் நிலைக்கு நிலைமாற்றம் பெறுவதை ஒளிஉட்கவர் சோதனை மூலம் அறியலாம்.

உறுதியாய் பிணைவுற்ற எக்சைட்டான்கள்

இதில் எலக்ட்ரானுக்கும் மின்துளைக்கும் இடையேயுள்ள தொலைவு, அணுஆரத்தை ஒப்பிட மிகவும் குறைவு. இதுபோன்ற எக்சைட்டான்களில், கிளர்வூட்டம் என்பது ஒரு தனி அணுவிற்கு அருகாமையிலுள்ள வட்டாரத்தில் காணப்படுகின்றது. இது

அணித்தளத்தில் ஓரணுவிலிருந்து மற்றோர் அணுவிற்குப் படர்ந்து செல்கின்றது. இதுபோன்ற எக்சைட்டான்கள் கார ஹாலைடு படிகத்தில் கண்டறிந்துள்ளனர்.

5.6 ஒளிர்தல் (Luminescence)

ஒரு பொருள் ஒருவகையான ஆற்றலை உட்கிரகித்து பின்னர் அதிலொரு பகுதியை கட்புலனுணர் அல்லது அதற்கு மிக அருகாமையிலுள்ள கதிர்வீச்சாக உமிழலாம். இது அடுத்தடுத்த நிலைகளில் நிகழ்கின்றது. ஊடகத்திலுள்ள மின்னணு அமைப்பை கிளர்வூட்டுதலும், அதைத் தொடர்ந்து நிகழும் கிளர்விறக்கத்தில் போன்டான்கள் உமிழ்தலும் அடுத்தடுத்து நடைபெறுகின்றன. இதையே உடனொளிர்தல் என்கின்றனர். ஊடகத்திலுள்ள எலக்ட்ரானை பல வகைகளில் கிளர்வூட்ட முடியும் என்பதால் உடனொளிர்தல் அதற்கேற்ப பல வகைப்படுகின்றது.

ஒளி உடனொளிர்வு (Photo luminescence)

இதில் கிளர்வூட்டம், போட்டானை உட்கவர்தலால் ஏற்படுகின்றது. இதில் போட்டான் மூலமாக அகச்சிவப்புக் கதிர் கட்புலனுணர் ஒளி, புறஊதாக்கதிர் மற்றும் எக்ஸ் கதிர்கள் பயன்படுத்தப்படுகின்றன.

எதிர்மின்கதிர் உடனொளிர்வு (Cathodoluminescence)

இதில் கிளர்வூட்டம், உயர் ஆற்றலுடைய எலக்ட்ரான்களால் அணித்தள அணுக்களை மோதச் செய்து பெறப்படுகின்றது. இதற்கு எதிர்மின் கதிரையோ, அல்லது முடுக்கப்பட்ட எலக்ட்ரான்களையோ பயன்படுத்துகின்றார்கள்.

மின் உடனொளிர்வு (Electroluminescence)

இதில் உயரளவு மின் கடத்தாப் பொருள் மாறிலி உடைய ஒரு மின்னேம ஊடகத்தில் படிகத்தை வைத்து, அதற்குக் குறுக்காக ஒரு மாறுதிசை மின்புலத்தைச் செயல்படுமாறு செய்து கிளர்வூட்டத்தைப் பெறுகின்றார்கள்.

வெப்ப உடனொளிர்வு (Thermoluminescence)

இயல்பு நிலைக்கு அப்பாற்பட்ட சிற்றுறுதியான நிலையில் உள்ள எலக்ட்ரான் கதிர்வீசி நிலைமாற்றத்திற்கு உட்படும்போது, ஏற்படும் வெப்பத்தினால் இங்கு கிளர்வூட்டம் செய்யப்படுகின்றது.

வேதி உடனொளிர்வு (Chemiluminescence)

சில ஆற்றல் உமிழ்வு வேதிவினைகளில், ஆற்றலானது வெப்பமாக வெளிப்படாமல், போட்டானாக வெளிப்படலாம். இதைக் கொண்டும் கிளர்வூட்டமுடியும்.

ஒளிர்தல் என்பது உடனொளிர்தல் (fluorescence), நின்றொளிர்தல் (Phosphorescence) என இருவகைப்படும். கிளர்வூட்டத்தின் போதே ஒளிஉமிழ்வும் நிகழ்ந்தால், அல்லது கிளர்வூட்டத்தை நிறுத்தியவுடன் 10^{-8} வினாடி என்ற குறுகிய காலத்திற்குள்ளேயே ஒளி உமிழ்வு நிகழ்ந்தால் அதை உடனொளிர்தல் என்றும், அவ்வாறின்றிக் கிளர்வூட்டம் நிறுத்தப்பட்டு நெடுநேரத்திற்குப் பிறகும் ஒளி உமிழ்வு நிகழ்ந்தால் அதை நின்றொளிர்தல் என்றும் கூறுவர். இத் தாமதகாலம் ஒரு வினாடியில் 10^6ல் 1 பங்கிலிருந்து ஒரு சில மணிகள் வரையிருக்கலாம். பல படிகங்கள் நின்றொளிர்வைக் காட்டுகின்றன. இவற்றை ஒளிர்மம் (Phosphor) என்பர்.

ஒரு பொருளின் ஒளிஉமிழ்திறன், அதனுடன் சேர்ந்துள்ள செயலூக்கிைப் (activator) பொறுத்திருக்கின்றது. செயலூக்கி பெரும்பாலும் ஒரு சிறப்பு வேற்றுப்பொருளின் அணுக்களாக மிகமிக நுண்ணிய அளவிலேயே சேர்ந்திருக்கும் அல்லது பொருளின் சேர்மானத்திலுள்ள ஒன்றின் வேதிச்சமானத்தை சிறிய அளவில் அதிகரித்திருக்கும். பெரும்பாலான ஒளிர்மங்கள் முதல்வகையைச் சார்ந்தனவாக இருக்கின்றன. இரண்டாம் வகை சுயசெயலூக்கத் திறன் (self activation) கொண்டது. தூய நிலையில் ஒளிஉமிழ் திறன் உடைய படிகங்களும் உள்ளன. எனினும் அவை மிகவும் தாழ்ந்த பயனுறுதிறனுடன் செயல்படுகின்றன. உயர் பயனுறுதிறன் என்பது பொதுவாகச் செயலூக்கியின் சேர்க்கையைப் பொறுத்திருக்கின்றது.

விழும் ஆற்றலைக் கட்புலனுணர் ஒளியாக மாற்றும் படிகத்தின் ஒளியியற் பண்பு பலதுறைகளில் பயன்தருகின்றது. ஒளிஉமிழ் குழல் விளக்கு, எதிர்மின்கதிர் அலைவுகாட்டி, ரேடார், தொலைக்காட்சிப்பெட்டி, அணுக்கதிர்வீச்சு மற்றும் அடிப்படைத் துகள்களை ஆராயும் ஆய்வுகருவிகளில் பயன்படுத்தப்படுவதைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம். இப்பயன்பாட்டிற்கு அனுகூலமாயிருக்கும் சில ஒளிர்மங்கள் பின்வருமாறு

1. தூயநிலையில் ஒளிஉமிழ் திறன் கொண்ட, மாங்கனஸ் ஹாலைடுகள், மாலிபிடேட்டுகள் சமேரியம் மற்றும் கடோலினியம் சல்பேட் மற்றும் பிளாட்டினோ சயனைடுகள் போன்ற சேர்மங்கள்.

2. காலியத்தால் (0.1%) செயலூக்கம் தூண்டப்பட்ட கார ஹாலைடுகள் மற்றும் சீசியம் அயோடைடு, காற்றிலுள்ள ஈரத்தை உட்கவரக்கூடியது என்றாலும் ஈரோப்பியத்தால் தூண்டப்பட்ட கால்சியம் அயோடைடு NaIஐவிடச் சிறப்பாகச் செயல்படுகின்றது.

3. Cd, Ag, Au, Mn இவற்றால் செயலூக்கம் தூண்டப்பட்ட துத்தநாக சல்பைடு (ZnS), காட்மியம் சல்பைடு (CdS) இவற்றைச் சுயசெயலூக்கம் பெறுமாறு செய்ய முடிகின்றது.

4. ZnO, Al_2O_3 போன்ற சுயசெயலூக்கம் தூண்டப்பட்ட ஆக்ஸைடு வகை ஒளிர்மங்கள்.

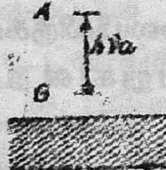
5. நாப்தாலினால் தூண்டப்பட்ட ஆந்தரசீன், ஸ்டில்பீன் ஒளிர்மங்கள் பென்சீன் வளையங்களால் சங்கிலித் தொடரில் உள்ள பல கரிமச் சேர்மங்கள் இதைவிடச் சிறந்த ஒளிஉமிழ் திறனைக் கொண்டுள்ளன. ஒளி உட்புகுதிறன் கரிமப் படிகங்களில் அதிகமாக இருந்தாலும், பயனுறுதிறன் குறிப்பாக எக்ஸ்கதிர், காமாக்கதிர், கனமான அடிப்படைத்துகள்களுக்கு மிகவும் குறைவு.

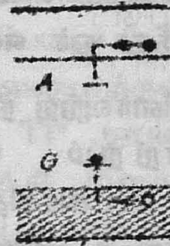
சில பிளாஸ்டிக் (நெகிழ்மம்) பொருட்களும் இந்த வகையில் அடங்கும்.

கிளர்வூட்டமும் ஒளி உமிழ்வும்

செயலூக்கியின் சேர்க்கையால், ஆற்றல் இடைவெளியில் ஒரு சில புதிய ஆற்றல் நிலைகள் தோன்றுகின்றன. இந்த வட்டார ஆற்றல் நிலைகளில் இரு வகையுண்டு. (1) செயலூக்கி அணுக்களோடு தொடர்புடைய ஆற்றல் நிலைகள், (2) செயலூக்கியின் தாக்கத்தால் சீர்குலைவுற்ற ஒளி உமிழ்வு ஊடகத்தின் அணுக்களோடு (பொதுவாக அண்டையிலுள்ள) தொடர்புடைய ஆற்றல் நிலைகள் அல்லது படிக வழுக்களுடன் (எ.கா. வெற்று இடங்கள்) தொடர்புடைய ஆற்றல் நிலைகள். ஏனெனில் இதன் தோற்றம், செயலூக்கி அணுக்களை அனைத்துக் கொள்வதோடு தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது.

கடத்து எலக்ட்ரான்
ஆற்றல் பட்டை





இணைதிற எலக்ட்ரான்
ஆற்றல் பட்டை

G - ஆடி நிலை
A - கிளர்ச்சி நிலை

(அ) கிளர்வூட்டம் போட்டானின் நேரடி உட்கிரகிப்பால் நிகழ்கின்றது

(ஆ) ஒரு மின்துறை G ஆல் உட்கவரப்பட, A ஆல் ஓர் எலக்ட்ரான் சிறைப்பிடிக்கப் படுகிறது.

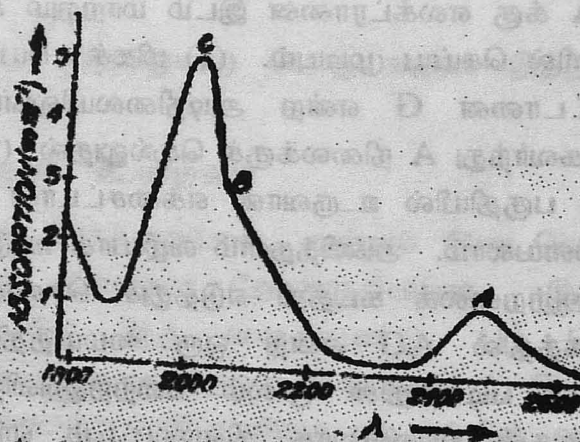
படம் 5.4

ஆற்றல் இடைவெளியில் G மற்றும் A என்ற இரு ஆற்றல் நிலைகளைக் கருதுவோம். அடிநிலையில் G என்ற ஆற்றல் நிலை எலக்ட்ரானால் இடம்பெற்றும், A வெறுமையாகவும் இருக்கும். கிளர்ச்சி நிலையில் இவையிரண்டும் இடம் மாறி அமைந்திருக்கும். G யிலிருந்து A க்கு எலக்ட்ரானை இடம் மாற்றும் கிளர்வூட்டத்தை மூன்று வகைகளில் செய்ய முடியும். (1) மிகச் சரியான அதிர்வெண் கொண்ட போட்டானை G என்ற அடிநிலையிலுள்ள எலக்ட்ரான் நேரடியாக உட்கவர்ந்து A நிலைக்குச் செல்லுதல். (2) கிளர்வூட்டம், படிகத்தின் ஒரு பகுதியில் உருவான எக்சைட்டான் ஊடுபரவுதலின் காரணமாக விளையலாம். அணித்தளம் வழியாக ஊடுருவிச் செல்லும் எக்சைட்டான் ஆற்றலைக் கடத்தி எடுத்துச் செல்கின்றது. இந்த ஆற்றலை படிகத்தில் AG என்ற ஒரு மையத்திற்கு கொடுத்து விடலாம். இது படிகத்தின் மூலம் வேற்றணுவிற்கு பரிமாற்றம் செய்யப்பட்டு அதன் விளைவாக கிளர்வூட்டம் ஏற்படலாம். (3) எலக்ட்ரான் மற்றும் மின்துளைகளின் தனித்த இயக்கத்தினாலும், கிளர்வூட்டம் ஏற்படலாம். படிகத்தில் விழும் ஒளியால், படிகத்தின் ஒரு பகுதியில் எலக்ட்ரான் மின்துளை உருவாகலாம். AG மையம் அடிநிலையில் இருப்பின், G நிலை இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல்

பட்டையிலிருந்து ஒரு மின்துளையையும் A நிலை கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து ஓர் எலக்ட்ரானையும் சிறைப்பிடிக்கலாம்.

ஒளிஉமிழ்வில், கிளர்வுற்ற நிலையிலிருக்கும் இந்த எலக்ட்ரான் அடிநிலைக்கு மாற்றம் பெறுகின்றது. ஏற்கனவே கிளர்வூட்டத்தின்போது உட்கிரகித்த அதேயளவு ஆற்றலை ஒளியாக உமிழ்கின்றது. ஆனால் உண்மைநிலை இதுபோல இருப்பதில்லை. இதைத் தாலியத்தால் செயலூக்கம் செய்யப்பட்ட பொட்டாசியம் குளோரைடு படிகத்தால் விளக்கி அறிவோம்.

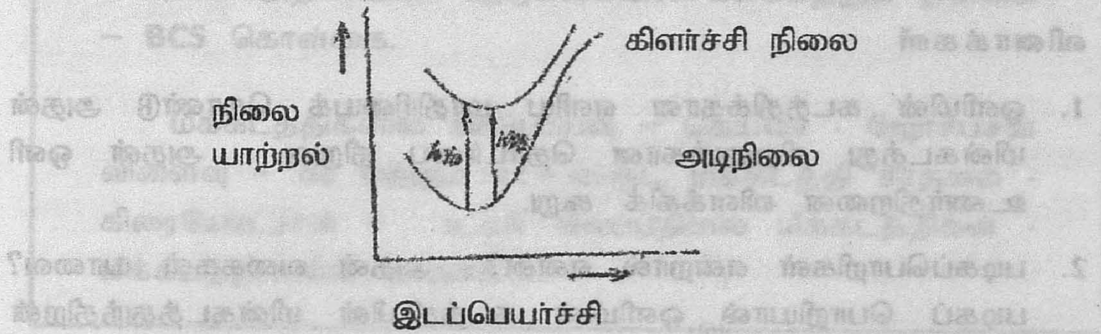
தாலியத்தால் செயலூக்கம் தூண்டப்பட்ட பொட்டாசியம் குளோரைடு, சோடியம் அயோடைடு படிகங்களில் வேற்றுப்பொருளான தாலியத்தின் செறிவு 0.01% ஆகும். Te^{+} என்ற தாலஸ் அயனிகள் இங்குமங்குமாக Na^{+} அயனிகளை இடம்பெயர்த்து அமைகின்றன. தூய பொட்டாசியம் குளோரைடின் உட்கவர் நிறமாலை 1650Aல் தொடங்கி குறுகிய அலைநீளம் பக்கமாக விரிந்துள்ளது. தாலியத்தின் சேர்க்கையால் புதிய உட்கவர் பட்டைகள் தோன்றுகின்றன. இதில் வலிமையான இரு முகடுகள் A(2490 A), C(1960 A) காணப்படுகின்றன. கூடுதலாக பலவீனமான ஒரு முகடு Bயும் காணப்படுகின்றது.



படம் 5.5 KCl:Tl^{+}–ன் உட்கவர் நிறமாலை

A தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலையிலும், C உயர் ஆற்றல் நிலையிலும் இருப்பதால், அவைகளுக்கிடையே எலக்ட்ரான் நிலைமாற்றம் பெறும் வாய்ப்பைப் பெறுகின்றது.

Tl^+ அயனி உறுதிச் சமநிலையை அடையும் முயற்சியில் Na^+ அயனியைப் போல அணித்தளத்தில் இடம்பெறுகின்றது. ஓய்வு நிலையிலிருந்து அது பெறும் இடப்பெயர்ச்சி Tl^+ அயனிக்கு அருகில் முழு அணித்தள அமைப்பின் நிலையாற்றலை அதிகரிக்கின்றது. கதிர்வீச்சு ஆற்றலை உட்கிரகித்த Tl^+ அயனி கிளர்ச்சி நிலையை அடைவதால், அதன் இடப்பெயர்ச்சி நிலையாற்றல், வரைகோடு அடிநிலையிலிருக்கும்போது இருப்பதைவிட வேறுபட்டிருக்கின்றது. முக்கியமாக நிலையாற்றல் சிறுமம் வெவ்வேறு அமைவிடங்களில் அமைந்துள்ளது.



படம் 5.6 அயனியின் இரு ஆற்றல் நிலைகளும் நிலைமாற்றமும்

A மற்றும் C நிலைகளுக்கிடைப்பட்ட நிலைமாற்றம் படம் 5.6ல் காட்டப்பட்டுள்ளது. இதையொத்த உட்கவர் நிறமாலையை Tl^+ அயனிகளைக் கொண்ட கரைசலும் கொண்டுள்ளது. இதைக் கொண்டு இந்த நிலைமாற்றம் $1S_o \rightarrow 3P_1$ மற்றும் $1S_o \rightarrow 1P_1$ இவைகளுக்கிடையே நிகழ்வதாகக் குறிப்பிடலாம்.

அடிநிலையில் Tl^+ அயனியின் எலக்ட்ரான் கட்டமைப்பு $6S^2$ எனலாம். புறக்கூட்டிலுள்ள இரு எலக்ட்ரான்களும் எதிரினையான தற்சுழற்சி கொண்டிருக்குமெனில் அதன் நிலையை $1S_o$ எனக் குறிப்பிடலாம். மிகத்தாழ்ந்த கிளர்ச்சி நிலையில் எலக்ட்ரான் கட்டமைப்பு $6S^1$, $6P^1$ ஆக இருக்கும். இது $3P_o$, $3P_2$ $1P_1$ போன்ற நிலைகளைக் கொண்டிருக்கும். நிறமாலையில் பொதுவான தேர்வுவிதி $\Delta J=0,\pm1$ என்பதால், $1S_o \rightarrow 3P_1$ மற்றும் $1S_o \rightarrow 1P_1$ ஆகிய நிலைமாற்றங்கள் மட்டும் அனுமதிக்கப்படுகின்றன. $1S_o \rightarrow 3P_0$

என்ற நிலைமாற்றம் $\Delta J=0$ என்பது அனுமதிக்கப்படாததால், ஏற்படுவதில்லை.

அயனியின் $1S_o$ என்ற அடிநிலை பொட்டாசியம் குளோரைடில் ஏறக்குறைய நிறைவுற்ற எலக்ட்ரான் ஆற்றல்பட்டையின் உச்சியில் இருக்கின்றது. KClல் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையின் கீழ்மட்டம் இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டையிலிருந்து 9.4 எ.வோ. தள்ளி இருக்கின்றது. கிளர்வுற்ற $3P^1$, $1P^1$ ஆற்றல் நிலைகள் ஒரு சில எ.வோ, கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் பட்டையிலிருந்து கீழாக இருக்கின்றது. இது கிளர்ச்சி எலக்ட்ரான் செயலூக்கியின் அணுவோடு வலுவாகப் பிணைந்துள்ளது என்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.

வினாக்கள்

1. ஒளிமின் கடத்திக்கான எளிய மாதிரியைக் கொண்டு அதன் மின்கடத்து திறனுக்கான தொடர்பை நிறுவு. அதன் ஒளி உணர்திறனை விளக்கிக் கூறு.
2. படிகப்பொறிகள் என்றால் என்ன? அதன் வகைகள் யாவை? படிகப் பொறியால் ஒளிமின் கடத்தியின் மின்கடத்துந்திறன் குறைகின்றது எனக் காட்டுக.
3. எக்சைட்டான் என்றால் என்ன?
4. ஒளிர்தல் என்றால் என்ன? அதன் வகைகள் யாவை?
5. தாலியத்தால் செயலூக்கம் தூண்டப்பட்ட கார ஹாலைடின் ஆற்றல்நிலை பரிமாற்றங்களை விவரித்து, கிளர்ச்சி எலக்ட்ரான் செயலூக்கியின் அணுவோடு பிணைந்துள்ளது எனக் காட்டுக.

6. மீக் கடத்திகள்

நிலைமாற்று வெப்பநிலை – மீக்கடத்தும் தனிமங்கள் - மீக்கடத்திகளின் சிறப்பியல்புகள் - மெய்ஸ்னர் விளைவு – மென், வன்மீக்கடத்திகள், சம அணுஎண்ம விளைவு – மீக்கடத்தியின் வெப்ப இயக்கப்பண்புகள்.

குவாண்ட ஆற்றலிடை வெளி - இலண்டனார் கொள்கை – உயர் அதிர்வெண் நெடுக்கையில் மீக்கடத்தும் தன்மை – BCS கொள்கை.

மீக்கடத்திகளில் ஊடுபாய்வு – கெய்வர் - ஜோசப்சன் விளைவு – dc மற்றும் ac – ஸ்குட் மீக்கடத்தி சாதனம் - கிரையோட்ரான் – உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகள் - மீக்கடத்திகளின் பயன்கள்.

6. மீக்கடத்திகள்

6.1. அறிமுகம்

மின்கடத்தும் திறனைப் பொருத்துப் பொருட்களை மூன்று பெரும் பிரிவுகளாகப் பிரிக்கலாம் என நாம் அறிவோம். இது மின்சாரத்தைக் கடத்திச் செல்லும் போது பொருள் ஏற்படுத்தும் மின் தடையைப் பொருத்தது. மின்சாரத்தை அதிகம் கடத்தும் பொருள் குறைவான மின் தடையையும், குறைவாகக் கடத்துவன அதிகமான மின்தடையையும் பெற்றிருக்கும். தங்கம், வெள்ளி, செம்பு, அலுமினியம் போன்ற உலோகங்கள் நற்கடத்திகளாகும். பிளாஸ்டிக், மரம் போன்றவை அரிதிற் கடத்திகளாகும். இவை இரண்டிற்கும் இடைப்பட்ட நிலையில் ஒரு சில பொருட்கள் மிதமாக மின் கடத்தும் திறன் பெற்றுள்ளன. அவற்றைக் குறைக் கடத்திகள் என்பர். சிலிகான், ஜெர்மானியம், காலியம் போன்றவை குறைகடத்திகளாகும். இதுபற்றி நாம் ஏழாம் அத்தியாயத்தில் தெரிந்து கொண்டோம்.

ஒரு பொருளின் மின்கடத்தும் திறன் அல்லது மின்தடை வெப்ப நிலையைப் பொருத்து மாறுபடுகின்றது. உலோகங்களில் வெப்பநிலை அதிகரிக்க மின்தடையும் அதிகரிக்கின்றது. உலோக அணுக்களின் புறக்கூட்டில் இருக்கும் ஓரிரு எலக்ட்ரான்கள், பிற எலக்ட்ரான்களைப் போல அணுக்கருவோடு பிணைந்திருப்பதில்லை. இதனால் அவை புறத்தூண்டல் ஏதுமின்றியே தானாக எளிதில் வெளியேறிவிடுகின்றன. திண்மப் பொருளில் அணுக்கள் நெருக்கமாக இருக்கும் போது இந்நிலை அனுகூலமாக இருப்பதால் கட்டற்ற தனி எலக்ட்ரான்கள் உண்டாகின்றன. இவற்றின் இயக்கம், வளிமத்திலுள்ள மூலக்கூறுகளைப் போல, உயர் வெப்பநிலையில் வீரியமாக இருப்பதால் மின்தடை அதிகரிக்கின்றது. அதாவது ஒரு திசை வழிச் செல்லும் எலக்ட்ரான்களின் இயக்கம் தடைப்படுகின்றது. குறைக்கடத்திகளின் வெப்பநிலை அதிகரிக்க, அதிலுள்ள வேதிப் பிணைப்புகள் முறிவுற்று கூடுதலாக எலக்ட்ரான்களும், நேர்மின் துளை (positive holes)களும் தோன்றுவதால் அதன் கடத்துதிறன் அதிகரிக்கின்றது.

வெப்பநிலை குறைய உலோகங்களின் மின்கடத்துதிறன் அதிகரிப்பதால் அதன் மின்தடை குறையும் என முதலில்

எதிர்பார்த்தார்கள், என்றாலும் சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலைக்கருகில் உலோகங்களின் மின்கடத்து திறன் எப்படி மாறுபடும் என்பது பற்றி ஏதும் அறியாதிருந்தார்கள். தாழ்ந்த வெப்பநிலையை ஏற்படுத்தி அதன் பின்னரே இதை உறுதி செய்ய வேண்டியிருந்தது. பொதுவாக மின்சாரம் கடத்தப்படுவதற்குக் காரணமாகும் எலக்ட்ரான்கள் உலோகங்களில் தளர்ச்சியாகக் கட்டுண்டிருக்கும். சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலைக்கருகில் இயக்கங்கள் முழுதுமாக நின்று போவதால், இந்த எலக்ட்ரான்கள் படிக அணித்தளத்தில் ஒன்றிணையலாம். அதாவது படிகத்தில் அணிவகுத்துள்ள அணுக்களோடு சேர்ந்து கொள்ளலாம் என்றும், அப்போது கடத்து எலக்ட்ரான்கள் முடங்கிப் போய்விடுவதால், உலோகத்தின் மின்கடத்துதிறன் சுழியாகவேண்டும் என்றும் எதிர்பார்த்தார்கள். ஆனால் சோதனை முடிவுகள் இதற்கு எதிர்மாறாக இருந்தன.

1911-ல் ஹாலந்து நாட்டு விஞ்ஞானியான காமர்லிங் ஓன்ஸ் என்பார் தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளை உண்டாக்கி, பாதரசத்தின் மின் கடத்துதிறனை வெவ்வேறு வெப்பநிலைகளில் கண்டறிந்தார். 4.2 டிகிரி கெல்வின் வெப்பநிலைக்குக் கீழ் பாதரசத்தைக் குளிர்வூட்டும் போது, அதன் மின்தடை சுழி வெப்பநிலையை எட்டுவதற்கு முன்பாகவே திடீரென்று சுழியாகி விடுவது அப்போது தெரியவந்தது. அதாவது பாதரசத்தின் மின்கடத்துதிறன் சுழிவெப்பநிலைக்கருகில் அனந்தமாகிவிடுகின்றது. வியப்பிற்கு மூலமாக விளங்கிய இந்நிலையை மிகைக்கடத்தும், அல்லது மீக்கடத்தும் நிலை என்றும், இத்தகைய பண்பைக் காட்டும் பொருட்களை மீக்கடத்திகள் என்றும் கூறுகின்றார்கள்.

6.2. நிலை மாற்று வெப்பநிலை (Transition temperature)

ஒரு சில உலோகங்களும், கலப்பு உலோகங்களும் தனிச்சுழி வெப்பநிலைக்கருகில், ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையில் தன் மின்கடத்தும் திறனை அனந்தமாக அதிகரித்து, மின்தடையைத் திடீரென்று சுழியாக்கிக் கொண்டு விடுகின்றன. சாதாரண வெப்பநிலையில் இயல்பான கடத்தும் நிலையும், தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் நிலையும் திண்ம – நீர்ம – வளிம நிலைகள் போன்று ஒரு பொருளுக்கு வெவ்வேறு நிலைகளாகும் - இயல்பான கடத்தும் நிலையிலிருந்து மீக்கடத்தும் நிலைக்கு மாற்றம்

பெறுவதை நிலைமாற்றம் என்றும், அது ஏற்படும் வெப்பநிலையை நிலைமாறு அல்லது பெயர்ச்சி வெப்பநிலை என்றும் கூறுவர். பொதுவாக நிலைமாறு வெப்பநிலை சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலைக்கருகில் இருப்பினும், பொருளின் தன்மைக்கு ஏற்பச் சிறிது வேறுபடுகின்றது. எடுத்துக்காட்டாக இவ்வெப்பநிலை ரேடியம் என்ற தனிம உலோகத்திற்கு **0.00037K** ஆகவும், ஹாபினியம் என்ற தனிமத்திற்கு **0.12K** ஆகவும், நையோபியம் என்ற உலோகத்திற்கு **9.25K** ஆகவும் உள்ளது.

தனி உலோகங்களைக் காட்டிலும் கலப்பு உலோகங்களின் நிலைமாறு வெப்பநிலை கூடுதலாக இருக்கின்றது. எடுத்துக்காட்டாக நையோபியம் - அலுமினியம் - ஜெர்மானியம் என்ற முக்கூட்டுக் கலப்பு உலோகத்தின் நிலைமாறு வெப்பநிலை **23K** ஆக உள்ளது. இதைவிட உயர் வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் சில கலப்பு உலோகங்களை இன்றைக்குக் கண்டுபிடித்துள்ளார்கள் என்றாலும், அறை வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் பொருள் இன்னும் கண்டறியப்படவில்லை. இன்றைய நிலையில் நிலைமாறு வெப்பநிலையின் உயர் வரம்பு **134 K** ஆகும். இதற்குரிய பொருள் பாதரசம் - தாலியம் - கால்சியம் - பேரியம் - செம்பு – ஆக்ஸிஜன் சேர்ந்த கனிமச் சேர்மமாகும்.

பொதுவாக கனிமச் சேர்மங்களின் நிலைமாறு வெப்பநிலை அதில் சேர்ந்துள்ள உலோகங்களின் நிலைமாறு வெப்பநிலையை விட அதிகமாக இருக்கின்றது. எடுத்துக்காட்டாக நையோபியம் நைட்ரேட்டின் நிலைமாறு வெப்பநிலை **14.7K** ஆக உள்ளது. நையோபியமும் டின்னும் சேர்ந்த கனிமச் சேர்மத்திற்கு இது **18.1K** ஆகும். இவை நையோபியத்தின் மீக்கடத்து நிலைமாறு வெப்பநிலையை விடச் சற்றேறக் குறைய இருமடங்காகும்.

6.3 மீக் கடத்தும் தனிமங்கள்

	1	2	3	4	5	6	7	8
1								
2								
3			Al 1.14 K	Si*	P*			
4				Ti 0.39 K	V 5.38 K	Cr *		
		Zn 0.87 K	Ga 1.09K	Ge*	As*	Se*		
5			Y*	Zr 0.55K	Nb 9.25K	Mo 0.92K	Tc 7.77K	Ru 0.51K
		Ca 0.56K	In 3.40K	Sn 3.72K	Sb*	Te*		
6	Cs*	Ba*	La 6K Ce* Lu 0.1K	Hf 0.12K	Ta 4.48 K	W 0.01K	Re 1.4 K	Os 0.65K Ir 0.14K
		Hg 4.15K	Tl 2.39 K	Pb 7.19 K	Bi *			
7			Th 137K U*					

படம்: 6.1. தனிம அட்டவணையில் மீக் கடத்தும் தனிமங்களின் அமைவிடமும், நிலைமாறு வெப்பநிலையும். (*: மென்படலமாக இருக்கும் போது மட்டும் மீக்கடத்துகின்றன)

தனிம அட்டவணையை நோக்க மீக்கடத்தும் தனிமங்கள் எல்லாம் ஒரு குறுகிய வட்டாரத்திற்குள் அமைந்திருப்பது தெரிய வருகின்றது. அவற்றின் நிலைமாறு வெப்பநிலைகளிலும் ஒரு குறிப்பிடும் படியான சீரான மாற்றம் காணப்படுகின்றது.

கார உலோகங்கள் (alkali metals) (முதல் தொகுதி முதல் வரிசை), பெர்லியம் தவிர்த்த காரமண் உலோகங்கள் (alkaline earth) (இரண்டாம் தொகுதி முதல் வரிசை), உயரின உலோகங்கள் (noble metals) (முதல் தொகுதி இரண்டாம் வரிசை), ஹாலஜென் வளிமங்கள் (ஏழாவது தொகுதி முதல் வரிசை), மந்த வளிமங்கள் (inert gas) (எட்டாவது தொகுதி முதல் வரிசை) போன்றவைகள் மீக்கடத்திகளாக இருப்பதில்லை. 5 மற்றும் 7 வது தொகுதிகளில் உள்ள தனிமங்களின் நிலைமாறு வெப்பநிலை பிறவற்றைக் காட்டிலும் கூடுதலாக இருக்கின்றது.

தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் புறத்தூண்டுதலின்றி இயல்பு நிலையில் 30 உலோகங்கள் மீக்கடத்தும் தன்மை கொண்டிருப்பதை அறிந்துள்ளனர். வேறு 17 உலோகங்கள் அழுத்தம் செயல்படும்போது

மீக்கடத்தும் திறனைத் தற்காலிகமாகப் பெறுகின்றன. சில மென்படலமாக (thin film) இருக்கும் போது மட்டும் மீக்கடத்துகின்றன.

மீக்கடத்தும் தனிமங்களைப் பற்றி விரிவாக மேற்கொள்ளப்பட்ட ஆய்வுகள் அவை தொடர்பான பல இயற்பியல் உண்மைகளைத் தெரிவித்துள்ளன.

1. அறை வெப்பநிலையில் எளிதில் கடத்தியாக விளங்கும், செம்பு, வெள்ளி, தங்கம் போன்ற உயரினத் தனிமங்கள் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியாக இருப்பதில்லை. ஆனால் அறை வெப்பநிலையில் அவற்றைவிடச் சுமாராகக் கடத்தும் துத்தநாகம், காரீயம் போன்ற சாதாரணக் கடத்திகள் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியாக நிலை மாற்றம் பெறுகின்றன.

2. ஓரளவு அதிகமான நிலைமாறு அல்லது நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக் கொண்டுள்ள மீக்கடத்திகள் எல்லாம் அறைவெப்பநிலையில், இயல்பான சூழலில் அரிதிற் கடத்திகளாக உள்ளன.

3. கார உலோகங்களில் சீசியமும், கார மண் உலோகங்களில் பேரியமும், தத்தம் தொகுதியிலுள்ள பிற உலோகங்களிலிருந்து மீக்கடத்தும் தன்மையால் வேறுபட்டுள்ளன. இவை சாதாரணமாக இருக்கும் நிலையில் மீக்கடத்தும் தன்மையைப் பெற்றிருப்பதில்லை. இவற்றின் மீது உயரழுத்தம் செயல்படும் போதும், அல்லது படிக ஒழுங்கமைவு சீர்குலைவுற்ற படலமாக அமையும் போதும் மீக்கடத்தியாக விளங்குகின்றன. அதனால் அவை நட்சத்திரக் குறியீடு இடப்பட்டுள்ளன. இவற்றின் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை செயல்படும் அழுத்தம் மற்றும் மென் படலத்தின் தடிப்பு இவற்றைப் பொருத்தது.

4. ஐந்து, நான்காவது தொகுதி இரண்டாம் வரிசைத் தனிமங்களில் பெருவாரியாகவும், ஆறு, ஏழாவது தொகுதி இரண்டாம் வரிசைத் தனிமங்களில் ஒரு சிலவும் மீக் கடத்திகளாக உள்ளன.

5. செம்பும், கந்தகமும் மீக்கடத்தியாக இருப்பதில்லை. ஆனால் காப்பர் சல்பைடு என்ற சேர்மம் மீக்கடத்தியாக உள்ளது. தனி உலோகமாக இருக்கும் போது மீக் கடத்தியாக இல்லாத

வேறு சில தனிமங்களும் கனிமச் சேர்மமாக இருக்கும் போது மீக்கடத்தியாக உள்ளன.

6. உலோகங்களின் சேர்க்கையாலான கலப்பு உலோகங்கள் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைப் பொருத்தவரையில் ஒரு பொதுவான விதியைப் பின்பற்றுகின்றன. எடுத்துக்காட்டாக, ஆறாவது தொகுதியிலுள்ள மாலிப்பிடினம் 50 சதவீதமும், நான்காவது தொகுதியிலுள்ள டைட்டானியம் 50 சதவீதமும் சேர்ந்த கலப்பு உலோகத்தின் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை, ஐந்தாவது தொகுதியிலுள்ள மீக்கடத்திகளின் சராசரி நிலைமாற்றுப்பெயர்ச்சி வெப்பநிலை நெடுக்கையில் அமைந்திருக்கின்றது. இது தனி உலோகங்களான மாலிப்பிடினம், டைட்டானியம் இவற்றின் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக் காட்டிலும் கூடுதலாக இருக்கின்றது.

7. மின் பொதிமங்கள் **(charge carriers)** செறிவு அதிகமாக இருக்குமாறு வேற்றுப்பொருள் சேர்க்கப்பட்ட சில குறைக்கடத்திகள் மீக்கடத்திகளாக இருப்பதுண்டு. சிலிகானும், ஜெர்மானியமும் உயரழுத்தத்தில் உலோகம் போலச் செயல்படுகின்றன. தூண்டப்பட்ட உலோக நிலையில் **(metalic phase)** அவை மீக்கடத்தியாக விளங்குகின்றன.

6.4. மீக்கடத்திகளின் சிறப்பியல்புகள்

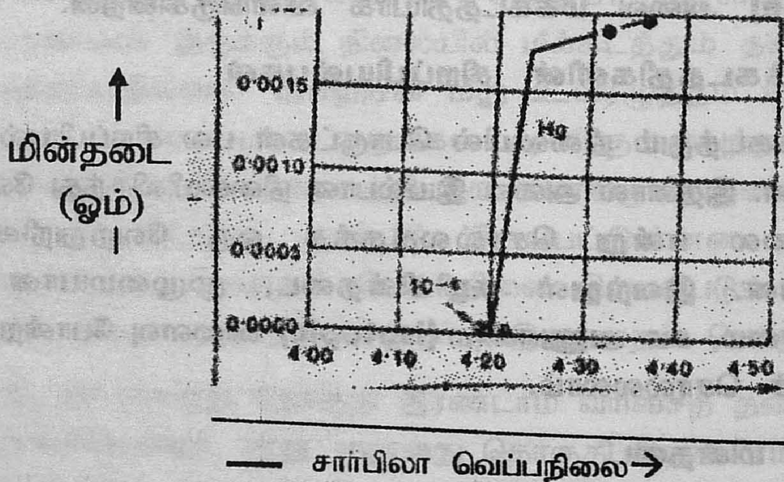
மீக்கடத்தும் நிலையில் பொருட்கள் பல சிறப்பியல்புகளைப் பெற்றுள்ளன. இதனால் அவை இயல்பான நிலையிலிருந்து வேறுபட்டுப் புதிய நிலை என்று சொல்லத்தக்க ஒரு வேற்றுநிலையைப் பெறுகின்றன. இவற்றுள் சுழிமின்தடை, முழுமையான டையா காந்தத்தன்மை, சம அணுஎண்ம **(isotopic)** விளைவு போன்றவற்றைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம்.

1. சுழி மின்தடை

மீக்கடத்தும் தன்மையைக் காட்டக் கூடிய ஒரு பொருளின் மின்தடையைப் படிப்படியாக வெப்பநிலையைக் குறைத்து அளவிட்டறிந்தால், அது நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை எட்டியவுடன் 0.05 K என்ற குறுகிய வெப்பநிலை நெடுக்கைக்குள் சுழியாகி விடுகின்றது. அதாவது சீராகக் குறைந்து கொண்டு வந்த

மின்தடை, நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் ஒரு குறுகிய நெடுக்கையில் திடீரென்று சரிவுற்றுச் சுழியை அடைகின்றது.

சுழிமின்தடையுடன் கூடிய ஒரு கடத்தி என்பது (இது தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் மட்டுமே இயலுவதாக இருக்கின்றது) மின்னியல் துறைக்குக் கிடைத்த மிகப்பெரிய அனுகூலம். இதற்குக் காரணம் மின்னோட்டத்திற்கு மீக்கடத்தியில் மின்தடையில்லாததால், ஆற்றல் இழப்பு தவிர்க்கப்படுகின்றது. அதாவது மின்சாரம் கடத்தி எடுத்துச் செல்லப்படும்போது, கடத்தி சூடுபடுத்தப்படுவதால் ஏற்படும் ஆற்றல் இழப்பு (ஜுல் வெப்ப இழப்பு) ஏற்படுவதில்லை. இதனால் மீக்கடத்தியாலான மின்சுற்று உயரளவு மின்சாரத்தையும் கடத்தும் திறனைப் பெறுகின்றது. மேலும் மின்சுற்றில் ஒரு முறை ஏற்படுத்திய மின்னோட்டம் மின்னியக்க விசை (electro motive force)யின்றியே நீண்ட காலத்திற்கு நிகழக்கூடியதாக இருக்கின்றது. இது தொடர்பாக மேற்கொள்ளப்பட்ட சோதனைகள் இலட்சம் ஆண்டுகளாயினும் மீக்கடத்தியாலான மின்சுற்றில் மின்னோட்டத்தின் செறிவில் வீழ்ச்சியில்லை என்று தெரிவித்துள்ளன. இது மீக்கடத்தியாலான மின்சுற்றில் மின்னோட்டம் அழியாது நிலைத்திருக்கும் என்பதைக் காட்டுகின்றது.



படம் : 6.2. தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியின் மின்தடை மாற்றமும் சுழி மின்தடையும்

2. புறக்காந்தப் புலத்தாக்கம்

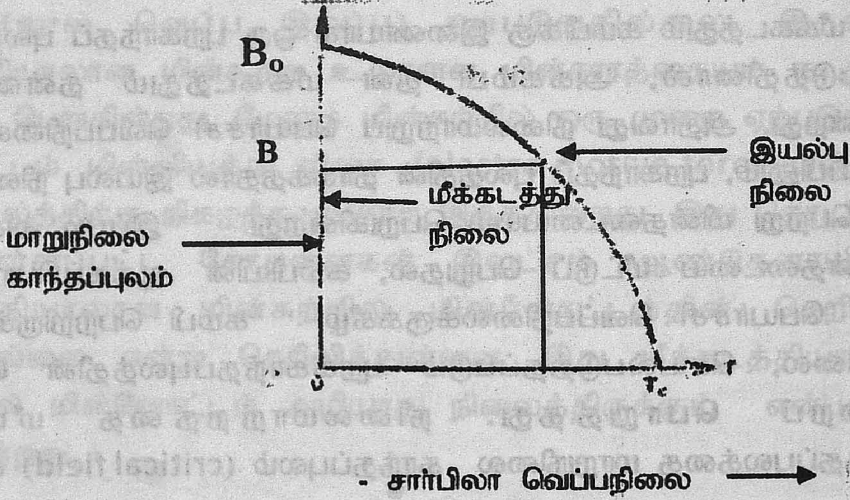
ஒரு பொருளின் மீக்கடத்தும் தன்மையை வெப்பநிலை உயர்வால் மட்டுமின்றி, வேறுசில இயற்பியல் கூறுகளின் மாற்றத்தாலும் பாதிப்படையுமாறு செய்யலாம். அவை காந்தப்புலம், ஒருதிசை மின்னோட்டம் (dc), மாறுதிசை மின்னோட்டத்தின் (ac) அதிர்வெண், வேற்றுப்பொருள் கலப்பு, படிகக் கட்டமைப்பில் ஏற்படுத்தப்படும் மாற்றம், பொருளிலுள்ள துகளின் உருவ அளவு, சம அணுஎண்மங்களின் சேர்க்கை போன்றவைகளாகும்.

மீக்கடத்தும் கம்பிக்கு இணையாக ஒரு புறகாந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்தினால், அக்கம்பி தன் மீக்கடத்தும் தன்மையை இழக்கின்றது. அதாவது நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழ் இருப்பினும், புறகாந்தப் புலத்தின் தாக்கத்தால் இயல்பு நிலையை மீட்டுப் பெற்று மின்தடையையும் பெறுகின்றது. இப்படி அக்கம்பி தன் மின்தடையை மீட்டுப் பெறுதல், கம்பியின் ஆக்கப்பொருளின் தன்மை, பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக்கீழ் கம்பி பெற்றிருக்கின்ற வெப்பநிலை, செயல்படுத்தப்படும் புறக்காந்தப்புலத்தின் செறிவு இவற்றைப் பொறுத்தது. நிலைமாற்றத்தை மீட்கும் புறக்காந்தப்புலத்தை மாறுநிலை காந்தப்புலம் (critical field) என்பர்.

நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக்கீழ் எவ்வளவு வெப்பநிலை தாழ்வாக இருக்கின்றதோ, அதற்கேற்ப புறக்காந்தப்புலத்தின் தாக்கத்தால் ஏற்படும் நிலைமாற்றத்திற்குக் கூடுதலான காந்தப்புலம் தேவைப்படும். அதாவது பொருளின் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழ் வெப்பநிலை குறையக்குறைய மாறுநிலை காந்தப்புலம் அதிகரிக்கின்றது. இதன்படி ஒரு பொருள் சார்பிலாச் சுழிவெப்பநிலையில் இருந்தால், நிலைமாற்றத்திற்குப் பெரும மாறுநிலை காந்தப்புலமும், மிகச் சரியாக நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் இருந்தால் சுழி (சிறும) மாறுநிலை காந்தப் புலமும், இடைநிலையில், சிறுமத்திலிருந்து பெருமம் வரையில் சீராக மாறுபடும் இடைநிலை காந்தப்புலமும் தேவையாய் இருக்கும்.

ஒரு குறிப்பிட்ட வெப்பநிலைக்குரிய மாறுநிலை காந்தப்புலத்திற்கும், சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலைக்குரிய மாறுநிலை காந்தப்புலத்திற்கும் B_o (பெருமம்) உள்ள தகவு, நிலை மாற்றுப்

பெயர்ச்சி வெப்பநிலையின் (T_c) இருமடிக்கும், மற்றும் அக்குறிப்பிட்ட வெப்பநிலையின் (T) இருமடிக்கும் உள்ள வேறுபாட்டிற்கும் பொருளின் நிலைமாற்றுப்பெயர்ச்சி வெப்பநிலை (T^2_c)-ன் இருமடிக்கும் உள்ள தகவிற்குச் சமமாக இருக்கின்றது. மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்திற்கும், சார்பிலா வெப்பநிலைக்கும்



படம்: 6.3. புறக்காந்தப்புலமும் மீக்கடத்து - இயல்புநிலை மாற்றமும்.

வரையப்பட்ட வரைகோடு, உள்நோக்கிய பரவளைய வடிவில் இருப்பதால் இது இப்படி நிறுவப்பட்டது. இதை டுயென் (Tuyn) விதி என்பர். இதன்படி

$$B_c = B_o \left(\frac{T_c^2 - T^2}{T_c^2} \right) \qquad (6.1)$$

உண்மையில் இவ்விதிக்கு மீக்கடத்திகளில் ஒரு வகையான மீக்கடத்திகள் மட்டுமே உட்படுகின்றன. இத்தொடர்பிலிருந்து $T = 0$ என்றிருக்கும்போது $B_c = B_o$, அதாவது பெரும மாறுநிலை காந்தப்புலம்

மீக்கடத்து இயல்புநிலை மாற்றத்திற்குத் தேவையாய் இருக்கின்றது என்பதையும் $T = T_c$ என்றிருக்கும்போது $B_c = 0$, அதாவது புறக்காந்தப்புலத்தின் தூண்டுதல் ஏதும் இல்லாமலே, இந்நிலை மாற்றத்தை வெறும் வெப்பநிலை உயர்வால் பெற்றுவிடுகின்றது என்பதையும் விளக்கிக்கொள்ள முடிகின்றது.

3. ஒருதிசை மின்னோட்டத்தால் விளையும் பாதிப்பு

மீக்கடத்தும் தன்மையின் சீரழிவு பற்றிக் காமர்லிங் ஓன்ஸ் குறிப்பிடுகையில் ஒருதிசை மின்னோட்டத்தின் தாக்கம் பற்றியும் தெரிவித்துள்ளார். மீக்கடத்தியின் வழியாகச் செல்லும் மின்னோட்டத்தின் அளவு அதிகரிக்கும்போது, ஒரு குறிப்பிட்ட மின்னோட்ட மதிப்பிற்கு மீக்கடத்தும் தன்மை சீரழிந்துவிடுகின்றது. காந்தப்புலத் தாக்கத்தின் போது வரையறுத்ததைப் போல இதை மாறுநிலை மின்னோட்டம் எனலாம். ஆனால் உண்மையில் இது மின்னோட்டத்தின் பாதிப்பில்லை என்பதும், மின்னோட்டத்தால் மீக்கடத்தியைச் சுற்றி உண்டாகும் காந்தப்புலத்தின் பாதிப்பேயாகும் என்பதும் பின்னர் அறியப்பட்டது.

ஆம்பியரின் வட்டச்சுற்று விதி (Ampere's circuital law), கம்பியின் புறப்பரப்பில் செயல்படும் காந்தப்புலத்திற்கும், கம்பி வழிச் செல்லும் மின்னோட்டத்திற்கும் இடைப்பட்ட தொடர்பைத் தருகின்றது.

$$\mu_o i_c = 2\pi r B_c$$

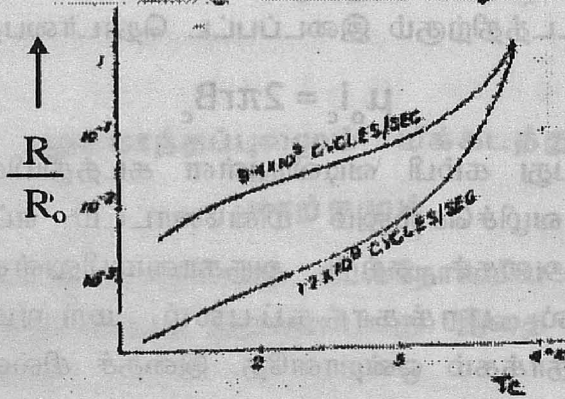
இதில் r என்பது கம்பி வடிவிலுள்ள கடத்தியின் ஆரமாகும். ஒரு கடத்தியின் வழிச்செல்லும் மின்னோட்டம் எப்போதும் ஒரு காந்தப்புலத்தை அதைச் சுற்றி அருகாமையிலுள்ள வெளியில் தோற்றுவிப்பதால் புறக்காந்தப்புலம் மற்றும் ஒருதிசை மின்னோட்டத்தின் தாக்கம் ஒன்றானதே. இதைச் சில்ஸ்பி (Silsbee) விதி என்று கூறுவர்.

4. மாறுதிசை மின்னோட்டதால் விளையும் பாதிப்பு

மாறுதிசை மின்னோட்டம் என்பது கம்பியின் இருமுனை நோக்கி கம்பிவழியாக மாறிமாறி மின்சாரம் பாய்வதாகும். அதாவது எலக்ட்ரான்கள் இடம் பெயராமல் தன் இருப்பிடத்திலேயே இருந்து கொண்டு அலைவுறுகின்றன. எனவே மாறுதிசை மின்னோட்டத்திற்கு அதிர்வெண் உண்டு. உயர் அதிர்வெண் எனில் மாறுதிசை

மின்னோட்டத்தின் செறிவு அதிகமாக இருக்கும் எனலாம். சாதாரணமாக நாம் வீடுகளில் பயன்படுத்தும் மாறுதிசை மின்சாரத்தில் இந்த அதிர்வெண் 50 ஹெர்ட்ஸ் ஆக உள்ளது. அதாவது ஒரு வினாடியில் எலக்ட்ரான் 50 முறை இரு திசைப்பக்கமாக அதிர்வுறுகின்றது.

மீக்கடத்தி வழிச் செல்லும் மாறுதிசை மின்னோட்டத்தின் அதிர்வெண் 10^7 (ஒரு கோடி) ஹெர்ட்ஸ் என்ற நெடுக்கைக்குள் இருக்கும் வரை அதன் மின்தடை மாற்றமின்றிச் சுழியாகவே இருக்கின்றது. அதாவது மீக்கடத்தி நிலையில் மாற்றம் ஏதுமில்லை. ஆனால் அதிர்வெண் 10^9 (நூறு கோடி) ஹெர்ட்ஸ் எல்லையை எட்டும் போது, மீக்கடத்தி தன் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழும் குறிப்பிடும்படியான அளவில் ஒரு மின்தடையைப் பெறுகின்றது. பிப்பார்டு (Pippard) என்ற விஞ்ஞானி மாறுதிசை மின்னோட்டத்தின் அதிர்வெண், நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் எந்த மாற்றத்தையும் தூண்டுவதில்லை என்றும், உயர் அதிர்வெண்ணிற்கு மாறுதிசை மற்றும் ஒருதிசை மின்னோட்டத்திற்கான மின்தடை மதிப்புகளின் தகவு அதிகமாக இருக்கின்றது என்றும் கண்டறிந்தார்.



- சார்பிலா வெப்பநிலை ⟶

படம்: 6.4. மாறுதிசை மின்னோட்ட அதிர்வெண்ணும் மாறும் மின்தடையும்.

5. அழுத்தத்தின் தாக்கம்

மீக்கடத்தியின் மீது செயல்படும் அழுத்தம் அதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் மாற்றத்தைத் தூண்டுகின்றது. அழுத்தத்தினால் பொருளிலுள்ள துகள்கள் இறுக்கப்பட்டு நெருக்கமாக வருகின்றன. அதனால் பொருளின் பரிமாணம் சுருங்குகின்றது. படிகக்கட்டமைப்பில் குறிப்பிடும் படியான மாற்றம் ஏற்படுவதால், நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை ஒரு பாஸ்கல் அழுத்தத்திற்கு நூறு கோடியில் ஒரு பங்கு கெல்வின் என்ற வீதத்தில் அதிகரிக்கின்றது. அதாவது dT_c/dp-ன் மதிப்பு 10^{-9} கெல்வின்/பாஸ்கல் என்ற நெடுக்கையில் உள்ளது. இது இவ்வளவு நுண்ணளவினதாக இருப்பதால், துல்லியமான, உணர்வு நுட்பமிக்கச் சோதனை முறையினால் மட்டுமே அறியமுடியும். இதோடு பின்னிய மற்றொரு விளைவு, இது மாறுநிலைக் காந்தப் பாயச்செறிவின் மதிப்பைச் சிறிதளவில் பாதிக்கின்றது என்பதாகும்.

செயல்படும் அழுத்தத்தை அதிகரித்து அறைவெப்பநிலையில் இல்லாவிட்டாலும், உயர் வெப்பநிலைகளில் மீக்கடத்திகளைப் பெற இது கொள்கையளவில் ஓர் அணுகுமுறையைக் காட்டியிருக்கின்றது.

6. சம அணுஎண்ம விளைவு **(Isotopic effect)**

ஒரு தனிமத்திலுள்ள அணுக்களெல்லாம் புறக்கூடுகளில் ஒரே மாதிரியான பங்கீட்டுத்தனத்திலும், எண்ணிக்கையிலும் எலக்ட்ரான்களைப் பெற்றிருந்தாலும், அவற்றின் அணுநிறையில் வேறுபாடு காணப்படுகின்றது. இதற்குக் காரணம் அவற்றின் அணுக்கருக்களில் சமஅளவு புரோட்டான்கள் இருப்பினும், நியூட்ரான்களின் எண்ணிக்கை ஒன்றிரண்டு குறைந்தோ அல்லது கூடியோ இருக்கலாம். வேதிவினையாற்றும் தன்மை ஒத்திருந்தாலும், மாறுபட்ட இயற்பியல் தன்மை கொண்டுள்ள இவற்றைச் சம அணுஎண்மங்கள் என்பர்.

ஒரே தனிமமானாலும், அவற்றின் வெவ்வேறு சமஅணு எண்மங்களுக்கான நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை மாறுபட்டதாக இருக்கின்றது. இதையே சம அணுஎண்ம விளைவு என்பர். இது பற்றி முதன் முதலில் மேக்ஸ்வெல் மற்றும் ரெய்னால்டு ஆகியோர் தெரிவித்தனர். பாதரச அணுவின் அணுநிறை 199.5 லிருந்து 203.4 வரை வேறுபட, நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 4.185

லிருந்து 4.144K வரை தாழ்வுறுகின்றது. பாதரசத்தைக் கொண்டு விரிவாக மேற்கொள்ளப்பட்ட ஆய்வுகள், நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை, சம அணு எண்மத்தின் அணுநிறையின் வர்க்க மூலத்திற்கு எதிர் விகித்திலிருக்கின்றது என்று தெரிவித்துள்ளன.

$$T_c \alpha M^{-1/2}$$

அல்லது $M^{1/2}T_c =$ மாறிலி (6.2)

பொதுவாகத் தனிமங்களின் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை மிகச் சரியாகச் சம அணுஎண்மத்தின் அணுநிறையின் வர்க்க மூலத்திற்கு எதிர்விகிதத்தில் இருப்பதில்லை. ஒருசில தனிமங்களில் சம அணுஎண்மங்களால் (ருதெனியம், சிர்கோனியம்) நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் மாற்றம் ஏதும் ஏற்படுவதில்லை. இதனால் (6.2) ஐ

$$M^{\alpha}T_c = \text{மாறிலி}$$

என்று திருத்தம் செய்வர். சோதனை மூலம் பெற்ற ஒரு சில தனிமங்களின் α-ன் மதிப்பு அட்டவணை (6.1)ல் தரப்பட்டுள்ளது.

அட்டவணை 6.1

α-சோதனை மதிப்புகள்

பொருள்	α
Zn	0.45
Cd	0.32
Sn	0.47
Hg	0.50
Pb	0.49
Te	0.61
Ru	0.00
Mo	0.33
Zr	0.00

சம அணுஎண்ம விளைவிற்கான விளக்கத்தைப் படிகத்தள அதிர்வியக்கத்தின் மூலம் விளக்கியுள்ளனர். தனிமத்தின் படிகத்தளத்தில் அணிவரிசையில் அமைந்துள்ள அணுக்கள், தாழ்ந்த வெப்பநிலையில், தன் சமநிலை இருப்பிடத்திலிருந்து கொண்டு அதிர்வுறுகின்றன. இந்த அதிர்வியக்கம் அணுநிறையைப் பொருத்துச் சிறிது வேறுபடுகின்றது. இது நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் பாதிப்பை ஏற்படுத்துகின்றது.

ஒரு சுருள்வில்லின் முனையில் இணைக்கப்பட்டுள்ள நிறையின் அதிர்வியக்கத்தின் அதிர்வெண், நிறையின் வர்க்கமூலத்திற்கு எதிர்விகிதத்திலிருக்கின்றது. இந்நெறிமுறை படிகத்தளத்திலிருந்து கொண்டு அதிர்வுறும் அணுக்களுக்கும் பொருந்தும். இந்த ஒற்றுமை, மீக்கடத்தும் நிலை என்பது ஏதோ ஒரு விதத்தில் படிக அணித்தளங்களுடனும், அவற்றின் ஊடாக இயங்கிச் செல்லும் எலக்ட்ரான்களுடனும் தொடர்பிருக்கின்றது என்பதைத் தெரிவிக்கின்றது.

அணித்தளத்திலுள்ள எல்லா அணுக்களும் அதிர்வுறுவதால், அதைப் படிக அணித்தள அதிர்வாகக் கூறுவர். சீரிசை அலைவியக்கம் போல இருக்கும் இதை மீட்சி அலை (elastic wave) என்பர். தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் திண்மப் பொருளின் வெப்பப் பண்புகளைப்பற்றி ஆராய்ந்த டீபை (Debye) என்பார், இது போன்ற அலைகள் படிகத்திற்குள் மட்டுமே உலவுகின்றன என்றும் ஒரு போதும் படிகத்தை விட்டுப் பிரிந்து வெளியேறுவுதில்லை என்றும் கூறினார். பொதுவாக அலைகள்யாவும், மின்காந்த அலைகள் போல குவாண்டம் அலகில் ஒரு குறிப்பிட்ட சிற்றளவிலான ஆற்றலைப் பெற்றிருக்கின்றன. இதையே போனான் (Phonon) என்பர். இதன் அலைநீளம் அணுவிடைத் தொலைவை ஒப்பிட அதிகமாக இருக்கின்றது என்பதால், இவ்வலையைப் பொருத்தமட்டில் திண்மத்தை ஒரு தொடர் ஊடகமாகக் கருதலாம். மேலும் அதிர்வெண்கள் சுழிமுதல் அனந்தம் வரை இருப்பதில்லை என்றும், ஒரு பெரும மதிப்பிற்கு உட்பட்ட மதிப்புகளை மட்டுமே கொண்டுள்ளன என்றும் டீபை தெரிவித்துள்ளார். ஏனெனில் அதிர்வெண் அனந்தம் என்றால் அவ்வலையின் ஆற்றலும் அனந்தமாயிருக்கும். நடைமுறையில் ஒரு திண்மம் அனந்த அளவு ஆற்றலைப் பெற்றிருக்கமுடியாது என்பதால் இக்கட்டுப்பாடு அவசியமானது.

பெரும அதிர்வெண் என்பது திண்மத்தின் ஒரு சிறப்பியல்பாகும். ஒளி அலையைப் போட்டான் துகள்களாகக் கருதுவதைப் போல, படிகத்தில் உலவும் ஒலி அலையைப் போனான் என்ற துகளாகக் கருதலாம். ஒலி ஆற்றலுக்கு இணையான வெப்ப ஆற்றலை வெப்பநிலையாலும் குறிப்பிடமுடியும். பெரும அதிர்வெண்ணுடைய போனானின் ஆற்றலை வெப்பநிலையால் குறிப்பிட்டு அதை டீபை வெப்பநிலை என்றழைக்கின்றார்கள்.

டீபை வெப்பநிலையும் (θ_D), மீக்கடத்தியின் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைபோல சம அணுஎண்ம விளைவிற்கு உட்படுகின்றது.

$\theta_D \alpha M^{-1/2}$ அல்லது $M^{1/2} \theta_D =$ மாறிலி

இதனால் மீக்கடத்தியின் நிலைமாற்றுப்பெயர்ச்சி வெப்ப நிலைக்கும், டீபை வெப்பநிலைக்கும் உள்ள தகவு ஒரு மாறிலியாக இருக்கின்றது.

$T_c / \theta_D =$ மாறிலி (6.3)

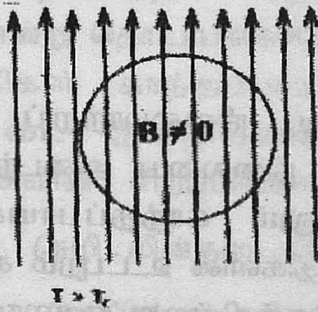
இது மீக்கடத்தும் தன்மை, படிக அணித்தள அதிர்வோடு ஏதோ ஒரு வகையில் தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது என்றும், அது எலக்ட்ரான்-படிகத்தள அதிர்வுகளுக்கிடையேயான இடைவினையால் தூண்டப்படுகின்றது என்றும் தெரிவிக்கின்றது. ஆனால் இந்த முடிவு, ஒரு சில தனிமங்களில் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை, சம அணுஎண்மத்தின் அணுநிறையைச் சாராதிருப்பதும், வேறு சில தனிமங்களில் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை சம அணுஎண்மத்தின் அணுநிறையின் ஏதாவதொரு பின்ன மதிப்பிற்கு எதிர்விகிதத்தில் இருப்பதும் அறியப்பட்ட பின்னர், தவறானதோ என்ற ஐயத்திற்கு உள்ளானது.

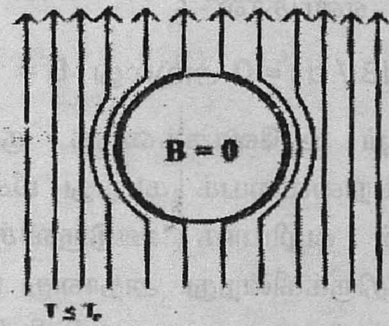
7. முழுமை டயா காந்தம் அல்லது மெய்ஸ்னர் விளைவு (Meissner Effect)

காந்தப்புலத்தில் ஒரு பொருளை வைத்தால் அதில் காந்தம் தூண்டப்படுகின்றது. தூண்டப்படும் காந்தத்தன்மையைப் பொருத்து அதன் ஊடாகக் காந்தப்பாயம் ஊடுருவிச் செல்கின்றது. புறவெளியில்

இருப்பதைவிடக் குறைவாக இருக்குமானால் அது டயா காந்தம் என்றும், சிறிதளவே அதிகமாக இருக்குமானால் பாரா காந்தம் என்றும், பெருமளவு அதிகமாக இருக்குமானால் பெரோகாந்தம் என்றும் கூறுவர்.

காந்தப்புலத்தில் ஒரு மீக்கடத்தியை வைத்தால், அது காந்தப் பாயத்தை ஊடுருவிச் செல்ல அனுமதிப்பதில்லை. ஒரு பொருளை, அதன் மீக்கடத்தும் நிலை பாதிக்கப்படாதவாறு ஒரு புறக் காந்தப்புலத்தில் இருக்குமாறு செய்தால் காந்தப்பாயம் வெளித்தள்ளப்பட்டு விடுகின்றது. ஒரு பொருளின் காந்தப் பண்பு எப்படி இருந்த போதிலும், வலிமையான காந்தப்பண்பைக் கொண்டிருந்தாலும் அது மீக்கடத்தும் நிலையிலிருக்கும்போது அதன் காந்த உட்புகுதிறன் சுழியாகி விடுகின்றது. அதாவது மீக்கடத்திகள் எல்லாம் முழுமையாக டயா காந்தமாக மாறிவிடுகின்றன. இதுவே மெய்ஸ்னர் விளைவு எனப்படுகின்றது.





வெப்பநிலை T	$T > T_c$	$T < T_c$
புறகாந்தப்புலம் B_a	$B_a > B_c$	$B_a < B_c$
அக காந்தப்புலம் B_i	$B_i > 0$	$B_i = 0$
நிலை:	இயல்புநிலை	மீக்கடத்துநிலை

படம் 6.5. மெய்ஸ்னர் விளைவு

$T<T_c$ வெப்பநிலையில் காந்தப்பாயச்செறிவு மீக்கடத்தியினுள்ளே சுழியாகி விடுவதால்,

$$B = B_a + \mu_o I = 0$$

அல்லது $\chi_{டயா} = -1$

இதில் வரும் எதிர்குறி மீக்கடத்திகளின் காந்தத்தன்மை டயாகாந்தமாகும் எனத் தெரிவிக்கின்றது.

மெய்ஸ்னர் விளைவு மேக்ஸ்வெல் சமன்பாட்டிற்கு முரண்பாடானதா?

மெய்ஸ்னரின் கண்டுபிடிப்பிற்கு முன்னர், மின்காந்த அலைக்கொள்கையில் நிறுவப்பட்ட மேக்ஸ்வெல் சமன்பாடுகள், மீக்கடத்தியின் இயற்பியலை விளக்கப் போதுமானதாகக் கருதப்பட்டன.

ஓமின் விதிப்படி $E = \rho J$

ρ மின்கடத்து திறனாகும். $\rho = 0$ எனில் J ன் எம்மதிப்பிற்கும் E சுழியாகும். எனவே மீக்கடத்தியின் உட்புறத்தில் $E = 0$ என்றவாறு இருக்கவேண்டும். மேலும் மேக்ஸ்வெல் சமன்பாட்டின்படி

$$\nabla \times E = -dB/dt$$

$E = 0$ என்பதால்

$dB/dt = 0$ அல்லது B = மாறிலி

ஓர் உலோகத்தைக் குளிர்வூட்டி, நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக் கடந்து மீக்கடத்து நிலையை அடைந்த பின்னர் அதன் வழியாக ஊடுருவிச் செல்லும் காந்தப்பாயச் செறிவு மாறாதிருக்கின்றது. அதாவது மீக்கடத்திகளின் உட்புறம் காந்தப்பாய் செறிவு மாறாது ஒரு மாறிலி போல இருக்கின்றது எனலாம். ஆனால் மெய்ஸ்னர் இயல்பு-மீக்கடத்து நிலைமாற்றத்தின் போது காந்தப்பாயத்தில் மாற்றம் ஏற்படுவதாகக் கண்டறிந்துள்ளார். கீழ்க்கண்ட சோதனை மெய்ஸ்னரின் கருத்தை உறுதிப்படுத்துவதாக இருக்கின்றது.

மீக்கடத்தும் ஓர் உலோகத் தண்டின் மீது முதன்மைச்சுருள், துணைச் சுருள்கள் சுற்றப்பட்டுள்ளன. முதன்மைச்சுருள், ஒரு மின்சாவி மூலமாக ஒரு மின்கலத்தோடும், துணைச்சுருள் கால்வனோமீட்டருடனும் இணைக்கப்பட்டுள்ளன. தொடக்கத்தில் சோதனைத் தண்டின் வெப்பநிலை, அதன் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக் காட்டிலும் சற்றுக் கூடுதலாக இருக்கட்டும். மின்சாவியைப் பொருத்தியதும் நிகழும் கணநேர மின்னோட்டம்,

ஒரு மின்னியக்கு விசையைத் தூண்டுவதால், துணைச்சுருள் சுற்றிலுள்ள கால்வனோமீட்டரில் எறிவிலக்கம் (kick) ஏற்படுகின்றது. முதன்மைச் சுற்றில் மின்னோட்டச் செறிவின் மாற்றம், சுற்றில் மின்னோட்டம் சுழியிலிருந்து பெரும மதிப்பை எட்டும் மட்டும் தொடர்கின்றது. அதன் பிறகு கால்வனோமீட்டரில் எறிவிலக்கம் சுழியாகிவிடுகின்றது. இப்பொழுது முதன்மைச் சுற்றில் நிலையான மின்னோட்டம் பாய, கடத்தியின் வெப்பநிலை தாழ்த்தப்பட்டு, அதன் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழான வெப்பநிலையை அடையுமாறு, அதாவது இயல்பு—மீக்கடத்து நிலைமாற்றம் பெறுமாறு செய்யப்படுகின்றது. நிலைமாற்றத்தின் போது காந்தப் பாயங்கள் வெளித்தள்ளப்படுவதால், சுருளில் ஒரு மின்னியக்கு விசை தூண்டப்பட்டுக் கால்வனோமீட்டரில் மீண்டும் ஒரு எறிவிலக்கம் காணப்படுகின்றது. இது மேக்ஸ்வெல்லின் சுழிமின்தடைக்குக் கற்பிக்கப்பட்ட B = மாறிலி என்ற கருத்துக்கு முரண்பாடாக விளங்குகின்றது.

சுழிமின்தடையும், காந்தப்பாயங்களின் வெளித்தள்ளலும் ஒன்றுக்கொன்று தொடர்பில்லாத இருவேறு தனி நிகழ்வுகள் என்றாலும் மீக்கடத்திகள் காந்தப்பாயங்களை வெளித்தள்ளலை நிறுவ சுழிமின்தடை இன்றியமையாததாக இருக்கின்றது. எனவே மீக்கடத்திகளின் சிறப்பியல்புகளாக

E = 0 (சுழி மின்தடையிலிருந்து)

B = 0 (மெய்ஸ்னர் விளைவிலிருந்து)

என்று குறிப்பிடலாம்.

எல்லா அமைப்புகளும் தன்னுடைய ஆற்றலை எப்போதும் தாழ்வாக இருக்குமாறு வைத்துக்கொள்ள இயல்பான நாட்டம் கொண்டுள்ளன. மீக்கடத்திகளின் காந்தப்பாய வெளித்தள்ளல் இம்முயற்சியின் ஒரு விளைவேயாகும். அப்போது மின்னோட்டம் கடத்தியின் புறப்பரப்பில் மட்டும் நிகழ்கின்றது. இதனால் தோற்றுவிக்கப்படும் புலம், மீக்கடத்திகள் உட்புறமுள்ள புலத்தை நீக்கிவிடுகின்றன. கடத்தியின் உட்புறமும் மின்னோட்டம் இருக்குமெனில், அங்கு காந்தப்பாயமும் இருக்க வேண்டும் என்பது அவசியமாகிவிடும். இது மெய்ஸ்னர் விதிக்கு முரண்பாடானது.

மீக்கடத்தியின் புறப்பரப்பில் நீடித்து அழியாதிருக்கும் மின்னோட்டம் மெய்ஸ்னர் விளைவிற்குக் காரணமாயிருக்கின்றது. ஏற்கனவே கடத்தியில் இருக்கும் காந்தப்பாயத்திற்கு எதிராகவும், சமமாகவும், இந்த புறப்பரப்பு மின்னோட்டம் காந்தப்பாயத்தை விளைவிப்பதால், உட்புறத்தில் மொத்தக் காந்தப்பாயம் சுழியாகிவிடுகின்றது. மீக்கடத்தியின் மின்தடை சுழியாக இருப்பதால், தூண்டலின் ஏற்படும் மின்னோட்டம், புறக்காந்தப்புலம் இருக்கும் வரை நீடித்து அழியாதிருக்கின்றது. புறக்காந்தப்புலம் இல்லாத போது இந்த தூண்டல் மின்னோட்டம் இருப்பதில்லை. இந்தத் மின்னோட்டத்தை மீ மின்னோட்டம் (super current) என்பர்.

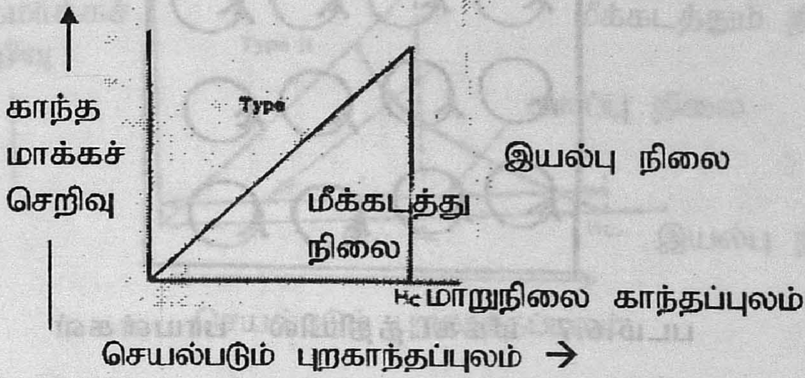
8. மீக்கடத்திகளின் வகைகள்

மீக்கடத்திகளை அவை காந்தமாக்கப்படும் தன்மையைக் கொண்டு இருவகைப்படுத்தலாம். அவை மென் (soft) அல்லது முதல்வகை (Type I) மீக்கடத்திகள் மற்றும் வன் (hard) அல்லது இரண்டாம் வகை (Type II) மீக்கடத்திகளாகும்.

மென்மீக்கடத்தி

மென்மீக்கடத்தியின் வெப்பநிலை, அதன் நிலை மாற்றுப்பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழிருக்கும் போது வெப்பநிலை குறையக் குறைய மாறுநிலை காந்தப்புலத்தின் மதிப்பு அதிகரிக்கின்றது. இவ்வகை மீக்கடத்திகள் மெய்ஸ்னர் விளைவிற்கு முற்றும் உட்படுகின்றன. அதாவது அவை மீக்கடத்தும் நிலைக்கு மாறியபின் முழுமையான டயாகாந்தமாக விளங்குகின்றன. மென்மீக்கடத்திகளின் உட்புறத்தில் காந்தப்புலச் செறிவு சுழியாகி விடுகின்றது என்ற உண்மையும் அதன் டயா காந்தத் தன்மையைப் புலப்படுத்துகின்றது. செயல்படும் காந்தப் புலச்செறிவை, மாறுநிலை காந்தப்புலத்தைக் காட்டிலும் கூடுதலாக இருக்குமாறு அதிகரிக்க, காந்தப்பாயம் கூடுதலாக ஊடுறுவி, ஒரு குறிப்பிட்ட நிலையில் சட்டென அதன் இயல்பு நிலையை மீட்டுப் பெறுகின்றது. மென்மீக்கடத்தியின் இவ்வியல்பை காந்தமாக்கச் செறிவு – புறக்காந்தப்புலம் இவைகளுக்கிடையேயான ஒரு வரை படம் மூலம் காட்டலாம். இது நிலைமாறு காந்தப்புலத்தில் நிகழும் நிலைமாற்றம் இருபோக்குத் தன்மை (reversible) கொண்டது எனத் தெரிவிக்கின்றது. அதாவது B_C-ன் மதிப்பை உயர்த்தி மீக்கடத்தும்

நிலையைச் சீரழிப்பதைப்போல, B_C-ன் மதிப்பைத் தாழ்த்தி மீக்கடத்தும் நிலையை மீட்டுப் பெறவும் முடியும்.



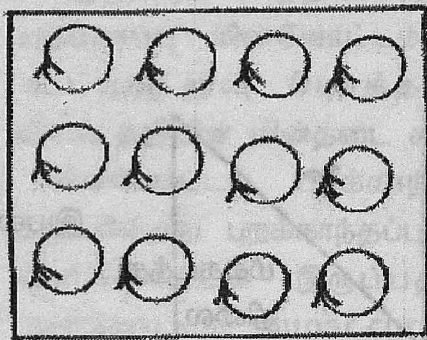
படம்: 6.6 மென் மீக்கடத்தியின் காந்தமாக்க வரைகோடு

டின், ஈயம், பாதரசம் போன்றவை மென்மீக்கடத்திகளாகும் B_C-ன் மதிப்பு இவ்வகை மீக்கடத்திகளுக்கு 0.1 டெஸ்லா என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது. அதனால் இவ்வகையைச் சேர்ந்த மீக்கடத்திகளை உயர்காந்தப் புலத்தைத் தோற்றுவிக்கவல்ல மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களில் பயன்படுத்த முடியாது.

வன்மீக்கடத்தி

இரண்டாம் வகையான வன்மீக்கடத்திகளில் புறகாந்தப் புலத்தை அதிகரிக்க, காந்தப்பாயம் கூடுதலாக ஊடுருவி, ஒரு குறிப்பிட்ட நிலைக்குப்பின் சீராகக்குறைந்து பின் மற்றொரு குறிப்பிட்ட நிலையில் இயல்பு நிலையை அடைகின்றது. அதாவது வன்மீக்கடத்திகளுக்கு இரு மாறுநிலைக் காந்தப்புலங்கள் உள்ளன. இவற்றைத் தாழ்ந்த மாறுநிலை காந்தப்புலம் (B_{C1}) என்றும் உயர் மாறுநிலை காந்தப்புலம் (B_{C2}) என்றும் கூறுவர். செயல்படும் காந்தப்புலம் தாழ்ந்த மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்தை விடக் குறைவாக இருக்கும் போது மீக்கடத்தி காந்தப் பாயத்தை முழுமையாக வெளித்தள்ளி முழுமையான டயா காந்தமாகக் திகழ்கின்றது. தாழ்ந்த மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்தைக் காட்டிலும் சற்றுக் கூடுதலான புலத்தில் காந்தப்பாயம் ஊடுருவத் தொடங்கினாலும் சீராக இருப்பதில்லை. அங்குமிங்குமாக வட்டார

மயமான தனித்த நுண் மின்சுற்றுகள் போல ஊடுருவல் தொடங்குகின்றது. இதைப் பாயன் (fluxoid) என்பர்.

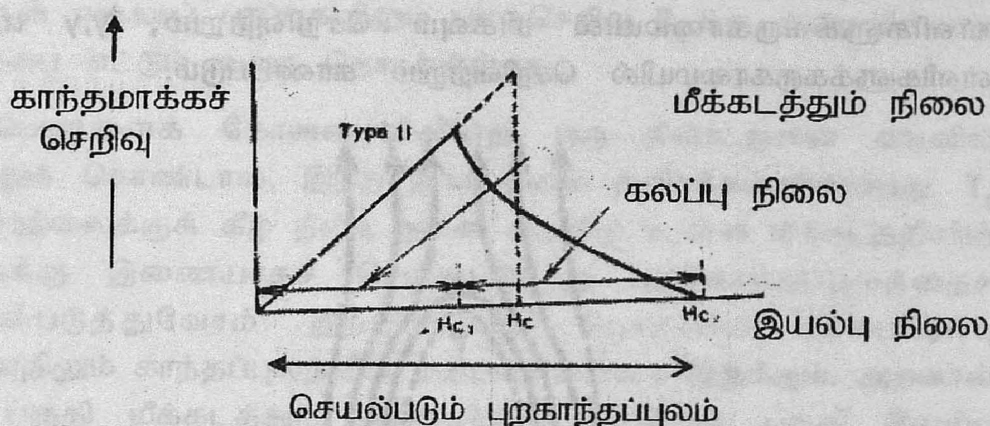


படம்:6.7 மீக்கடத்தியில் பாயன்கள்

ஒவ்வொரு பாயனும் நுண்ணிய உள்ளகத்தைப் பெற்றிருப்பதாகவும், அதன் வழியாகக் காந்தப்பாயம் ஊடுருவிச் செல்வதாகவும் கருதலாம். காந்தப் பாயச் செறிவில் ஏற்படும் மாற்றம் பாயனில் விளிம்புச் சுற்றில் ஒரு மின்னோட்டத்தை நிலைத்திருக்கச் செய்கின்றது. ஒவ்வொரு பாயனிலும் இப்படி நிலவும் காந்தப்பாயத்தின் அளவு குவாண்டம் மதிப்புகளால் நிறுவப்படுகின்றது. இதன் மதிப்பை 2.0678×10^{-7} டெஸ்லா/மீ^{2} என மதிப்பிட்டுள்ளனர்.

ஒரு பாயனின் விட்டம் 10^{-7} மீட்டர் என்ற அளவில் உள்ளது. தூய, குறைபாடற்ற வன்மீக் கடத்திகளில் இந்தப் பாயன்கள் படிகத்தளத்தில் காணப்படும் அணுக்களின் அணிவரிசைபோலச் சீராக அணிவகுத்து அமைந்திருக்கும். தாழ்ந்த மாறுநிலை காந்தப்புலத்திற்கும், உயர் மாறுநிலைக் காந்தப் புலத்திற்கும் இடைப்பட்ட காந்தப்புலத்தில், மீக்கடத்தியில், மீக்கடத்து நிலையும், இயல்பு நிலையும் கலந்து ஓர் இடைநிலையில் இருக்கும். புலச்செறிவு அதிகரிக்க பாயன்களின் எண்ணிக்கை அதிகரித்து, உயர் மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்தில் மீக்கடத்தியின் பரிமாணம் முழுவதிலும் நிறைந்து விடுகின்றது. அந்நிலையில் மீக்கடத்தி முழுமையாக இயல்பு நிலைக்கு மாற்றம் பெறுகின்றது. வன் மீக்கடத்தியின் இவ்வியல்பை ஒரு வரைபடம் மூலம் காட்டலாம். மென்மீக்கடத்திகளில் காந்தமாக்கச்செறிவு மாறுநிலை காந்தப்புலத்தில் திடீரென்று சரிவுற்றுச் சுழியாகி விடுகின்றது. ஆனால் இரண்டாம் வகையான வன்மீக்கடத்திகளில் இது சீரற்றுப் படிப்படியாக நிகழ்கின்றது. மேலும்

மாறுநிலை காந்தப்புலம் வன்மீக் கடத்திகளுக்கு, மென்மீக்கடத்திகளுக்கு உள்ளதைப் போல 100 மடங்காக உள்ளது.



படம்:6.8 வன்மீக்கடத்தியின் காந்தமாக்க வரைகோடு

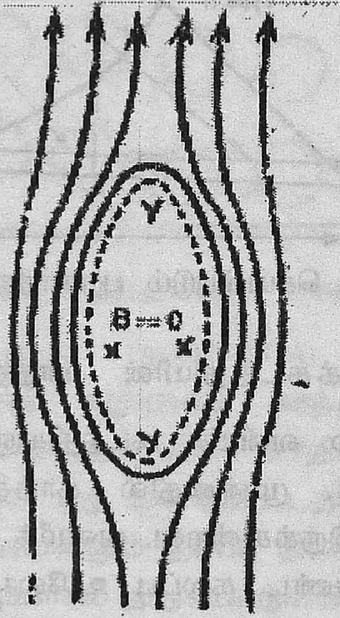
மென் மற்றும் வன்மீக் கடத்திகளுக்கிடையே காணப்படும் மற்றொரு வேறுபாடு, முன்னதில் காந்தமாக்கம் இருபோக்குத் தன்மையுடையதாக இருக்கின்றது. வன்மீக் கடத்திகளில் குறிப்பாகப் படிகத் தன்மை கொண்ட கலப்பு உலோகங்களில் இருபோக்கற்ற தன்மையைக் காணமுடிகின்றது. அதாவது அவை தயக்கக்கண்ணி வரைகோட்டைப் பின்பற்றக் கூடியதாக இருக்கின்றன. நையோபியம், வனேடியம் போன்ற ஒருபடித்தான உலோகங்கள் ஈயம், இண்டியம், டின்-இண்டியம் போன்ற ஒருபடித்தன்மை ஊட்டப்பட்ட கலப்பு உலோகங்கள், இரண்டாம்வகை மீக்கடத்திகளானாலும், அவற்றின் காந்தமாக்கம் முதல்வகை மீக்கடத்திகளைப் போல இருபோக்குத் தன்மை கொண்டதாக இருக்கின்றன.

இயல்புநிலையில் மிகவும் அதிகஅளவு மின்தடை எண்ணைக் கொண்டுள்ள இடைநிலை உலோகங்கள் மற்றும் கலப்பு உலோகங்கள், போன்றவை வன்மீக்கடத்திகளாகும்.

இடைநிலை (intermediate state)

கோள வடிவிலுள்ள மீக்கடத்தியில் ஏற்படும் மெய்ஸ்னர் விளைவைக் கருதுவோம். இதன் வெப்பநிலை T_C-க்குக் கீழே இருக்கட்டும் புறகாந்தப்புலத்தைச் செயல்படுத்துவதற்கு முன்னர்

மீக்கடத்தியின் உட்புறம் B = 0 ஆகும். புறகாந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்தப்படும் போது இந்த நிபந்தனை நிலை நிறுத்தப்படுகின்றது. அதனால் காந்தப்பாயக் கோடுகள் x,x என்ற புள்ளிகளுக்கருகாமையில் மிகவும் செறிவுற்றும், y,y என்ற புள்ளிகளுக்கருகாமையில் செறிவற்றும் காணப்படும்.



படம்: 6.9 மீக்கடத்தும் - இயல்பு நிலையும் கலவுற்ற இடைநிலை

அதாவது கோளத்தின் வலது - இடது பக்கங்களில் செயல்படும் காந்தப்புலம், அதன் மேல் மற்றும் கீழ் பகுதிகளில் செயல்படும் காந்தப்புலத்தை விட அதிகமாக இருக்கின்றது. எனவே புறகாந்தப்புலத்தின் செறிவை அதிகரிக்கும்போது புலச்செறிவு கோளப்பக்கங்களில் B_c-ன் மதிப்பை, கோளத்தின் மேல் மற்றும் கீழ்ப் பகுதிகளைக் காட்டிலும் முன்பாகவே எட்டி விடுகின்றது. அதனால் கோளத்தின் வலது-இடது பக்கப் பகுதிகளில் நிலை மாற்றம் முதலில் தொடங்குகின்றது எனலாம். இந்நிலையில் கோளத்தின் மேல் மற்றும் கீழ்ப் பகுதிகளில் செயல்படும் காந்தப்புலம் நிலைமாறு புலச்செறிவை விடக் குறைவாக இருப்பதால் அப்பகுதி மீக்கடத்தும் நிலையிலேயே இருக்கும். எனவே இந்நிலையில் மீக்கடத்தும் நிலை மற்றும் இயல்பு நிலை இவற்றின் கலப்பு நிலையாகப் பொருள்

விளங்கும். இதை மீக்கடத்தும் இடைநிலை என்பர். செயல்படும் புறகாந்தப் புலத்தின் செறிவை அதிகரிக்க, மீக்கடத்தும் நிலை குன்றி, அங்கு அதற்கேற்ப இயல்பு நிலை தோன்றுகின்றது. இது பொருள் எல்லாப் பரப்புகளிலும் புலச்செறிவு B_c-க்கு குறைவில்லாத மதிப்பை எட்டும் வரை தொடர்கின்றது.

பொருளைக் கோளவடிவிலின்றி ஒரு நீள்உருளை வடிவில் எடுத்துக் கொண்டால், இந்த இடைநிலை தவிர்க்கப்படுகின்றது. T_c வெப்பநிலைக்குக் கீழ் நீள்உருளை வடிவில் உள்ள மீக்கடத்தியின் அச்சுக்கு இணையாகச் செயல்படுமாறு புறக்காந்தப்புலத்தைச் செயல்படுத்துவோம். இந்நிலையில் பொருளின் பக்கப்பரப்பு முழுவதிலும் காந்தப்புலத்தின் மதிப்புச் சமமாக இருக்கும். அதனால் ஒரு பகுதி மீக்கடத்தும் நிலையிலும், மற்றொரு பகுதி இயல்பு நிலையிலும் இருக்கும் இடைநிலை காணப்படுவதில்லை.

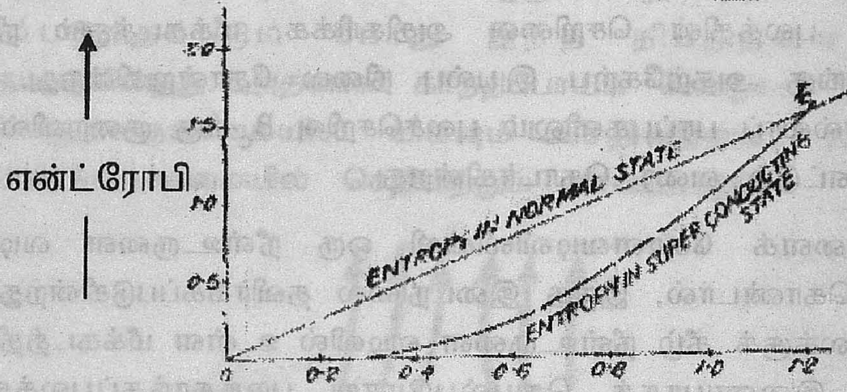
6.5. மீக்கடத்தியின் வெப்ப இயக்கப் பண்புகள்

ஓர் உலோகம் குளிர்விக்கப்பட்டு அது தன் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை எட்டும் நிலையில், அதன் மின் மற்றும் காந்தப் பண்புகளில் குறிப்பிடும் படியான மாற்றம் விளைவதைப் போல, அதன் வெப்ப இயக்கப் பண்புகளிலும் குறிப்பிடும்படியான மாற்றம் ஏற்படுகின்றது. இவற்றுள் என்ட்ரோபி, வெப்பக் கொள்திறன், வெப்பங்கடத்து திறன் போன்றவற்றைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம்.

என்ட்ரோபி

ஓர் அமைப்பின் பயன்தரு ஆற்றலை என்ட்ரோபி என்ற இயற்பியல் பண்பால் குறிப்பிடுவார்கள். இயக்கநிலை மாற்றத்திற்கு எப்படிப் பொருளின் நிறை ஒரு நிலைத்தடையாகச் செயல்படுகின்றதோ அதுபோல என்ட்ரோபி வெப்பப்பாய்விற்கு ஒரு வெப்பத்தடையாக விளங்குகின்றது. ஓர் அமைப்பின் என்ட்ரோபி அதன் ஒழுங்கின்மையோடு தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது.

இயல்பு நிலையிலிருந்து மீக்கடத்தும் நிலைக்குச் செல்லும்போது என்ட்ரோபி தாழ்வுறுகின்றது. இது மீக்கடத்தும் நிலையில் செவ்வொழுங்கு இயல்பு நிலையைக் காட்டிலும் கூடுதலாக இருக்கின்றது என்பதைக் கூறுகின்றது.



வெப்பநிலை (கெல்வின்) →

படம்: 6.10. தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் ஓர் உலோகத்தின் என்ட்ரோபி

இவ்விரு நிலைகளுக்குமுள்ள என்ட்ரோபி வேறுபாடு 10^{-3} Nk_B ஜூல்/மோல்/கெல்வின் என்ற அளவில் மிகவும் சொற்பமாக இருக்கின்றது. சாதாரணமாக நிகழும் நிலைமாற்றங்களில் இந்த வேறுபாடு Nk_B என்ற நெடுக்கையில் இருக்கும். மீக்கடத்தும் நிலைக்கு நிலைமாற்றம் பெறும்போது ஏற்படும் சொற்ப அளவு என்ட்ரோபி மாற்றம், கட்டமைப்பில் மேற்கொள்ளப்படும் மாற்றமும் சிறிய அளவிலேயே இருக்கின்றது என்று தெரிவிக்கின்றது. இயல்பு நிலையில் வெப்பக்கிளர்ச்சியுற்று இருக்கும் எலக்ட்ரான்கள், மீக்கடத்தும் நிலையில் அமைதியுற்று அணியில் அமைகின்றன. இப்படி அமைதியுற்று அணிவகுத்தல் என்பது மென்மீக் கடத்திகளில் 10^{-6} மீட்டர் நெடுக்கைக்குட்பட்ட நீளம் வரை விரிந்திருக்கின்றது. இதை இசைவினைத் தொலைவு (coherence length) என்பர்.

ஒரு பொருளின் நீர்ம – வளிம மாற்றம் எப்படி இருபோக்குத் தன்மை கொண்டதாக இருக்கின்றதோ, அதுபோல ஒரு பொருளின் இயல்பு மற்றும் மீக்கடத்தும் நிலையிடை நிலைமாற்றமும் வெப்ப இயக்கவியல்படி இருபோக்குத் தன்மை கொண்டுள்ளது எனலாம். வெப்ப இயக்கவியல் அடிப்படையில் இந்நிலை மாற்றத்தை அணுகி, இவ்விரு நிலைகளுக்கும் உள்ள என்ட்ரோபி வேறுபாட்டை நிலைமாறு காந்தப்புலத்தின் மதிப்புடன் தொடர்புபடுத்திப் பெறலாம்.

மெய்ஸ்னர் விளைவிற்கு முழுமையாக இணங்கும் முதல் வகை மீக்கடத்திகளைக் கருதுவோம். எனவே மீக்கடத்தியின் உட்புறம் $B = 0$ எனக் கொள்ளலாம். மேலும் மீக்கடத்தும் நிலையும் இயல்பு நிலையும் மாறா வெப்பநிலை மற்றும் அழுத்தம் என்றிருக்கும்போது பெற்றிருக்கும் சமநிலையில், ஏற்படும் நிலை மாற்றத்தை எடுத்துக் கொள்வோம். இதுபோன்ற நிலைமாற்றங்களில் கிப்ஸ் ஆற்றல் (Gibb's function) மாறாதிருக்கின்றது.

$$G = U + PV - TS$$

(U – என்தால்பி, P – அழுத்தம், V – பருமன், T – வெப்பநிலை, S – என்ட்ரோபி) மாறா அழுத்தத்தில், காந்தப்புலத்தில் ஓரலகு பருமனுள்ள பொருளின் கிப்ஸ் ஆற்றல்,

$$G = U - TS - BI \quad (6.4)$$

(B – காந்தப் பாயச் செறிவு, I – காந்தமாக்கச் செறிவு)

(இருபோக்குத் தன்மை கொண்ட காந்தமாக்க வழிமுறைக்கு வெப்ப இயக்கவியலின் இரண்டாவது விதிப்படி

$$du = Tds + B_a dI$$

$B_a = B + \mu_o I$ என்பதால் $dI = dBa / \mu_o$

எனவே $du = Tds + B_a\, dB_a / \mu_o$

அழுத்தம் மற்றும் பரும மாற்றங்களுக்கு மட்டும் உள்ளாகும் ஓர் அமைப்பில்

$$du = Tds - Pdv$$

இவ்விரு சமன்பாடுகளையும் ஒப்பிடச் செயல்படுகாந்தப்புலம் என்பது அழுத்தம் போன்றும், காந்தமாக்கச்செறிவு என்பது – பருமன் போன்றும் செயல்படுகின்றன என்று கொள்ளலாம்.)

பகுதியாக்கம் செய்தால்

$$dG = dU - TdS - SdT - BdI - IdB$$

$dU = TdS + BdI$ என்பதால்

$$dG = -SdT - IdB \quad (6.5)$$

$dT = 0$ என்பதால்

$dG = -IdB$

$dB = 0$ எனில் $dG = 0$ அல்லது $G =$ மாறிலி. எனவே இயல்புநிலையில் கிப்ஸ் ஆற்றல் Bயைச் சார்ந்திருப்பதில்லை. எனவே இயல்பு நிலையில் ஓரலகுப் பருமனுள்ள பொருளின் கிப்ஸ் ஆற்றல் செயல்படும் காந்தப்புலத்தால் மாறுவதில்லை. அதாவது காந்தப்புலம் இருந்தாலும், இல்லாவிட்டாலும், இயல்பு நிலையில் கிப்ஸ் ஆற்றல் சமம்.

$$G_N (T, B) = G_N(T,0) \tag{6.6}$$

இதே சூழ்நிலையில் இருக்கும் மீக்கடத்தும் நிலையில் உள்ள பொருள் எனில்

$B = 0, I = -B_a/\mu_o$

மாறா வெப்பநிலையில்

$dG_s = -IdB_a = B_a/\mu_o \, dB_a$

சுழிக்காந்தப் புலத்திலிருந்து நிலைமாறு காந்தப்புலம் வரை உயர்த்த கிப்ஸ் ஆற்றலில் ஏற்படும் வேறுபாடு

$$G_s(T,B_c) - G_s(T,0) = \frac{1}{\mu_o}\int_o^{B_c} B_a.dB_a = Bc^2/2\mu_o$$

வரம்பு நிபந்தனைக்கேற்ப, மாறு நிலைக் காந்தப் புலத்தில் இயல்பு நிலை மற்றும் மீக்கடத்தும் நிலைகளின் கிப்ஸ் ஆற்றல் சமமாக இருக்கவேண்டும். எனவே

$$G_S (T, B_c) = G_N (T,B_c) = G_N (T,0)$$

இம்முடிவைக் கொண்டு

$$G_N (T,B_c) = G_N (T,0) = G_S (T,0) + 1/2B_c^{\,2}/ \mu_o \tag{6.7}$$

இத் தொடர்பு $B \geq B_C$ எனில், $G_S (T,o) < G_N (T,o)$ என்று தெரிவிக்கின்றது. அதாவது $B \geq B_C$ எனில் இயல்பு நிலை அதிக நிலைப்புத் தன்மை கொண்டதாக இருக்கின்றது எனலாம். $B \geq B_C$ என்றபோது மீக்கடத்தும் நிலை இருக்கமுடியாது என்று இதன்மூலம் நிறுவலாம்.

கிப்ஸ் ஆற்றலுக்கான இத்தொடர்பைப் பயன்படுத்தி இந்நிலை மாற்றத்தின் போது ஏற்படும் என்ட்ரோபி வேறுபாட்டைக் கணக்கிட்டறியலாம். $dB = 0$ எனில் சமன்பாடு (6.5) லிருந்து

$$dG = -SdT$$

அல்லது $-S = (dG/dT)_B$

சமன்பாடு (6.7) லிருந்து

$$dG_N/dT = dG_S/dT + B_C/\mu o\ (dB_C/dT)$$

என்ட்ரோபியைத் தொடர்புபடுத்தி

$$S_N = S_S - B_C/\mu o\ (dB_C/dT) \qquad (6.8)$$

$T = Tc$ எனில் $B_c = 0$ என்பதால்

$S_N = S_S$, $T = T_C$ என்ற நிலையில்

இவ்விளக்கத்திலிருந்து, மாறுநிலைப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் இயல்பு மற்றும் மீக்கடத்தும் நிலைகளின் என்ட்ரோபியின் மதிப்புகள் சமமாக இருக்கும் என்பதையும், தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளில் அதாவது $T < T_C$, $B_C > 0$, எனவே dB_C/dT எதிர்க்குறி கொண்ட மதிப்புடையதாக இருக்கும் என்பதையும், அந்நிலையில் $S_N > S_S$ ஆக இருக்கும் என்பதையும் தெரிந்து கொள்ளலாம். இது மீக்கடத்தும் நிலையில் என்ட்ரோபி இயல்பு நிலையைக் காட்டிலும் குறைவு என்றும், அந்நிலை என்பது கூடுதல் செவ்வொழுங்கு பெற்ற நிலை என்றும் தெரிவிக்கின்றது.

வெப்ப ஏற்புத்திறன்

வெப்ப ஏற்புத்திறன் என்பது ஒரு கிலோகிராம் நிறையுள்ள பொருள், ஒரு டிகிரி கெல்வின் வெப்பநிலை உயர்வைப் பெற ஏற்றுக் கொள்ளும் வெப்பத்தின் அளவாகும். ஒரு குறிப்பிட்ட தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் பொருளின் மீக்கடத்தும் மற்றும் இயல்பு நிலைகளைத் தனித்தனியே பெற்று, அவற்றின் வெப்ப ஏற்புத் திறன்களை மதிப்பிட முடியும். தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் பொருளின் இயல்புநிலையை, அதன் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழ் நிலைமாறு காந்தப் புலத்தை விட அதிகமான காந்தப் புலத்தைத் தோற்றுவித்துப் பெறமுடியும்.

மோலார் வெப்ப ஏற்புத் திறனை

$$C_V = (dQ/dT)_V = T\,(dS/dT)$$

என அறிவோம். எனவே மீக்கடத்தும் நிலை, மற்றும் இயல்பு நிலைகளில் பொருளின் மோலார் வெப்ப ஏற்புத்திறனில் காணப்படும் வேறுபாட்டை

$$C_S - C_N = T\,d/dT\,(S_S - S_N)$$

சமன்பாடு (6.8) யைக் கொண்டு

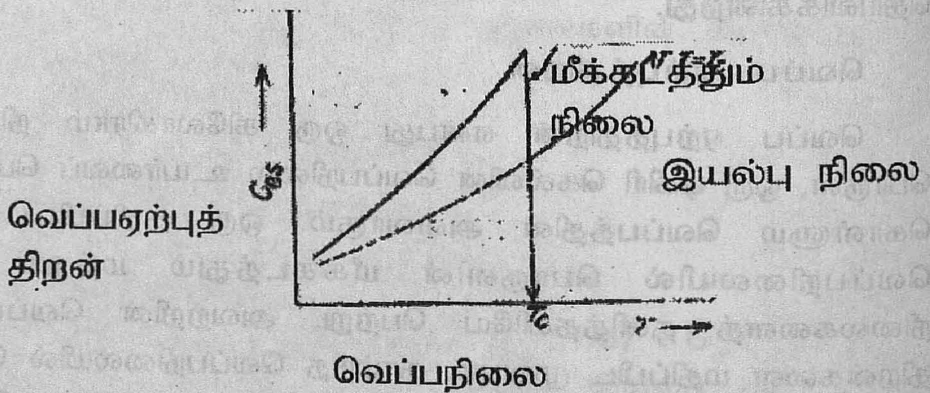
$$C_S - C_N = T\,d/dT\,(B_c/\mu_o\ dB_C/dT)$$

$$= T/\mu_o\,(dB_C/dT)^2 = T\,B_c/\mu o\ (d^2B_C/\,dT^2) \quad (6.9)$$

நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் $T = T_C$, $B_C = O$; எனவே

$$C_S - C_N = T_C/\mu_O \left(\frac{dB_c}{dT}\right)^2_{T=T_C} \quad (6.10)$$

இதை ருட்கெர் (Rutger) தொடர்பு என்பர். இத்தொடர்புகளிலிருந்து ஓர் உலோகத்தைக் காந்தப்புலம் செயல்படாத நிலையில் குளிர்வூட்டியோ, அல்லது வெப்பப்படுத்தியோ, நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக் கடக்குமாறு செய்யும் போது, அதன் வெப்ப ஏற்புத்திறனில் ஒரு தொடர்ச்சியின்மை காணப்படுகின்றது என்பதைத் தெரிந்து கொள்ள முடிகின்றது. மேலும் இச் சமன்பாடு $C_S > C_N$ என்றும் தெரிவிக்கின்றது.



படம். 6.11 இயல்பு – மீக்கடத்தும் நிலைகளில் ஓம் உலோகத்தின் வெப்பநிலை சார்ந்த வெப்பு ஏற்புத்திறன்

தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் புறகாந்தப்புலத்தைச் செயல்படுத்தி மீக்கடத்தும் நிலைமைச் சீரழிக்கும் போது C_S-C_N-ன் மதிப்பின் நேர்குறித் தன்மை எதிர்குறித் தன்மையுடையதாக மாறுகின்றது. ஏனெனில் S_N-S_S அதிகரித்துப் பெருமத்தை எட்டிய பின் குறைகின்றது.

நிலைமாற்றத்தின் போது வெப்ப ஏற்புத்திறனில் ஏற்படும் திடீர் மாற்றத்தைச் சோதனை மூலம் உறுதிப்படுத்தியுள்ளார்கள். இயல்பு நிலையில் பொருளின் வெப்ப ஏற்புத்திறன் பெருமளவு அதிலுள்ள கடந்து எலக்ட்ரான்களினாலும், சிறிதளவு அணித்தள அதிர்வுகளினாலும் பங்களிப்புப் பெறுகின்றது.

$$C_N = C_{eN} + C_{lN}$$
$$= aT + b\left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3$$

இதில் a,b என்பன மாறிலிகள், θ_D என்பது டிபை வெப்பநிலை வெப்ப ஏற்புத்திறனின் இரு பகுதிகளை C_N/T-க்கும் T^2க்கும் ஒரு வரைபடம் வரைந்து தனித்துப் பிரிக்கலாம். ஆய அச்சை வெட்டும் புள்ளியிலிருந்து a-ன் மதிப்பையும், வரைகோட்டின் சரிவிலிருந்து b/θ_D^3- ன் மதிப்பையும் பெறலாம்.

வெப்ப ஏற்புத்திறனுக்கு அணித்தள அதிர்வுகளாலான பங்களிப்பு, மீக்கடத்தும் நிலையில் மாற்றம் பெறுவதில்லை. எனவே கடத்து எலக்ட்ரான்களாலான பங்களிப்பு மட்டுமே இந்நிலைமாற்றத்தில் மாறுதலடைகின்றது. இயல்பு நிலையில் எலக்ட்ரான் வழி வெப்ப ஏற்புத்திறன், சார்பிலா வெப்பநிலைக்கு நேர்விகிதத்தில் இருப்பதைப் போலன்றி, மீக்கடத்தும் நிலையில் C_{es}-ன் மதிப்பு e-ன் அடுக்கில் மாறுபடுவதாக இருக்கின்றது. இதை

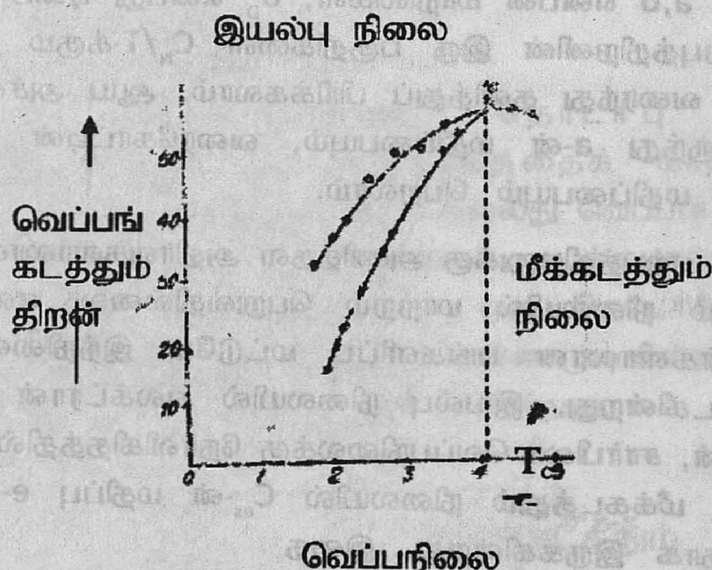
$$C_{es} \propto e^{-b(T_c/T)} = e^{-bk_BT_C/k_BT} = e^{-\Delta k_BT} \qquad (6.11)$$

இத்தொடர்பு மீக்கடத்துவதற்குக் காரணமாக இருக்கும் எலக்ட்ரான்களுக்கு குவாண்டம் ஆற்றல் நிலைகள் இருக்கக்கூடும் என்று தெரிவிக்கின்றது. இது மீக்கடத்தும் தன்மைக்கும், குவாண்டம் இயக்கவியலுக்கும் ஒரு நெருக்கமான தொடர்பு இருக்கலாம் என்பதைச் சுட்டிக் காட்டியுள்ளது. சமன்பாடு (6.11)-ன்படி தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் எலக்ட்ரான்களின் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைக்கும், முதல் கிளர்ச்சி நிலைக்கும் இடைப்பட்ட ஆற்றல் நிலைக்கும், முதல் கிளர்ச்சி நிலைக்கும் இடைப்பட்ட ஆற்றல் இடைவெளி bk_BT_C என்ற

நெடுக்கையில் இருக்கின்றது. ஆற்றல் மட்டங்களுக்கு இடை ஊடான வெப்பக் கிளர்ச்சி வெப்பநிலை சார்ந்த e-ன் சார்பாக இருக்கின்றது என்பதை நாம் குவாண்டம் இயக்கவியல் மூலம் அறிவோம். எனவே மீக்கடத்திகளில் கற்பிக்கப்படும் இவ்வாற்றல் இடைவெளி, மீக்கடத்தும் தன்மை, குவாண்டம் இயக்கவியலை அடிப்படையாகக் கொண்டிருக்கலாம் என்று நாம் முடிவு செய்யலாம்.

வெப்பங் கடத்துதிறன்

இயல்பு – மீக்கடத்தும் நிலை மாற்றத்தின் போது பொருளின் வெப்பங்கடத்தும் திறன் தொடர்ச்சியான மாற்றத்திற்கு உள்ளாகின்றது என்றாலும், பொதுவாக மென்மீக்கடத்திகளில், மீக்கடத்தும் நிலையில் வெப்பங்கடத்தும் திறன், இயல்பு நிலையில் உள்ளதைவிடக் குறைவாக இருக்கின்றது.



படம்:6.12. இயல்பு மற்றும் மீக்கடத்தும் நிலைகளில் ஓர் உலோகத்தின் வெப்பநிலை சார்ந்த வெப்பங்கடத்து திறன்

வெப்பங்கடத்தும் திறனில் குறைவு ஏற்படுவதற்குக் காரணம், எலக்ட்ரான்களின் பங்களிப்புக் குறைந்து போய் விடுவதுதான். இதனால் எலக்ட்ரான்களை இயல்பு எலக்ட்ரான்கள், மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்கள் என இருவகையாகப் பிரித்துக் கொண்டுள்ளார்கள். நிலைமாற்றத்தின் போது இயல்பு எலக்ட்ரான்கள், மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களாக

மாறுகின்றன என்றும், இந்த மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களோ, வெப்பக்கடத்தலில் சிறிதும் ஈடுபடுவதில்லை என்றும் கொண்டு இதற்கு விளக்கம்' அளிக்கப்பட்டது.

வெப்பங்கடத்தும் திறனைப் பொறுத்தமட்டில், வன், மென் மீக்கடத்திகள் வேறுபடுகின்றன. மென்மீக்கடத்தியில் இயல்பு நிலையில் கூடுதலாகவும், வன்மீக்கடத்திகளில் மீக்கடத்தும் நிலையில் கூடுதலாகவும் வெப்பங்கடத்தும் திறன் காணப்படுகின்றது. வன்மீக்கடத்தியில் காணப்படும் இந்த வேறுபாட்டிற்குப் படிக அணித்தள அதிர்வலைகள் எலக்ட்ரான்களால் சிதறலுக்கு உள்ளாவதில் ஏற்படும் குறைவு காரணமாக இருக்கலாம். பொதுவாக இச்சிதறலுக்கு இயல்பு எலக்ட்ரான்கள் மட்டுமே காரணமாக இருப்பதாலும், மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்கள் காரணமாக இருப்பதில்லை என்பதாலும் இக்குறைபாடு ஏற்படுகின்றது.

பொதுவாக மின்கடத்தும்திறன் அதிகமாக இருந்தால், வெப்பங்கடத்தும்திறனும் அதிகமாக இருக்கும் (எ.கா. செம்பு, வெள்ளி, தங்கம், அலுமினியம்). அதனால் செம்பையும், அலுமினியத்தையும் மின்சாரம் கடத்தும் கம்பியாகவும், சமைக்க உதவும் பாத்திரமாகவும் பயன்படுத்த முடிகின்றது. ஆனால் வேற்றுப்பொருள் கலப்பில்லாத சிலிகான், ஜெர்மானியம் போன்ற தூய குறைக்கடத்திகளின் வெப்பங்கடத்தும்திறன், மீக்கடத்தும் நிலையில், இயல்புநிலையில் பெற்றிருப்பதைவிடக் குறைவாக இருக்கின்றது. இப்பண்பு வெப்ப இயக்க மின்சாவிகளில் (heat switches) பயன்படுத்தப்படுகின்றது. தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் கம்பியால் இணைக்கப்பட்ட இரு பொருட்களுக்கிடையேயான வெப்பத்தொடர்பைப் புறகாந்தப் புலத்தைச் செயல்படுத்தி ஏற்படுத்தவும், நீக்கவும் முடியும்.

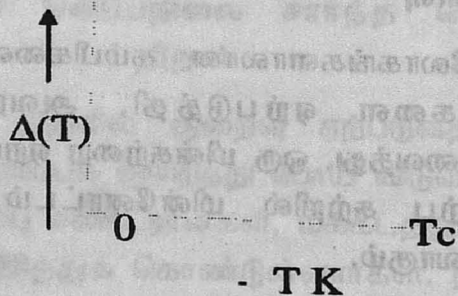
வெப்பமின் விளைவு

இருவேறு உலோகங்களாலான கம்பிகளைக் கொண்டு இரு சந்திப்பு முனைகளை ஏற்படுத்தி, அவற்றை வெவ்வேறு வெப்பநிலைகளில் வைத்து, ஒரு மின்சுற்றை ஏற்படுத்த, வெப்பநிலை வேறுபாட்டிற்கு ஏற்ப சுற்றில் மின்னோட்டம் நிகழும். இதுவே வெப்பமின் விளைவாகும்.

மீக்கடத்தும் நிலையில் வெப்பமின்விளைவு மறைந்து விடுகின்றது. இருவேறு உலோகங்களாலான வெப்பமின் இரட்டை மீக்கடத்தும் நிலையிலிருக்குமாறு அவற்றின் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழ் ஒரு பொதுவான வெப்பநிலையில் வைக்கப்படுகின்றது. அதன் இரு சந்திப்புகளையும் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில், வெவ்வேறு வெப்பநிலைகளில் இருக்குமாறு செய்தால், இயல்பு நிலையில் ஏற்படுவது போல, மீக்கடத்து நிலையில் ஒரு வெப்பமின்னியக்கு விசையும், மின்னோட்டமும் தோன்றுவதில்லை.

குவாண்ட ஆற்றலிடைவெளி (Energy gap)

மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களாலான வெப்பஏற்புத்திறனின் பங்களிப்பு $e^{-b(T_c/T)}$ அல்லது $e^{-\Delta(T)/k_B T}$ என்றவாறு e-ன் சார்பில் வெப்பநிலையைப் பொருத்து மாறுதலடைகின்றது என்று முன்பு பார்த்தோம். இது மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களுக்கு உள்ள ஆற்றல் நிலைகளைப் பற்றியும், ஆற்றலிடைவெளி பற்றியும் தெரிவிக்கின்றது. ஆற்றல் இடைவெளி என்பது மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரானின் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைக்கும், அது கிளர்ச்சி பெறுவதால் பெறும் ஆற்றல் நிலைகளில் தாழ்ந்த ஆற்றல் நிலைக்கும் (இயல்பு எலக்ட்ரான் நிலை) உள்ள வேறுபாடான ஆற்றலேயாகும். இது வெப்பநிலையைப் பொருத்து வேறுபட்ட மதிப்புடையதாக இருக்கின்றது. அதனால் இதை $\Delta(T)$ எனக் குறிப்பிடுகின்றோம். சார்பிலாச் சுழிவெப்பநிலையில் அதிகமாய் உள்ள ஆற்றலிடைவெளி, வெப்பநிலை அதிகரிக்கக் குறைவுற்று $T=T_c$ என்ற நிலையில் சுழியாகிவிடுகின்றது. வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாறும் $\Delta(T)$–ஒரு வரைபடம் மூலம் காட்டப்பட்டுள்ளது. குவாண்டம்

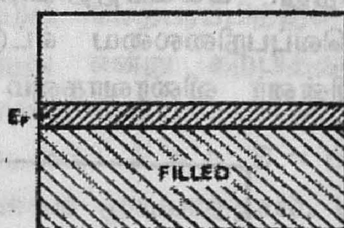


படம்:6.13 வெப்பநிலைக்கேற்ப மாறும் ஆற்றலிடைவெளி

இயக்கவியலில் ஆற்றலிடைவெளிகளிடையேயான வெப்பக்கிளர்ச்சி, வெப்பநிலை சார்ந்த e-ன் சார்பாக இருக்கின்றது. எனவே மீக்கடத்திகளுக்குக் கற்பிக்கப்பட்ட ஆற்றலிடைவெளி, மீக்கடத்தும் தன்மை என்பது குவாண்டம் இயக்கத்தை மூலமாகக் கொண்டிருக்க வேண்டும் என அறிவுறுத்துகின்றது.

மீக்கடத்தும் நிலையில் காணப்படும் ஆற்றல் இடைவெளியும், மின்கடத்தாப் பொருளில் உள்ள ஆற்றலிடைவெளியும் முற்றிலும் வேறுபட்டவை. மின்கடத்தாப் பொருளில் ஆற்றலிடைவெளிப் படிக அணித்தளத்தால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. ஆனால் மீக்கடத்திகளில் இது பெர்மி வளிமமான எலக்ட்ரான்களால் விளைகின்றது. மீக்கடத்தும் நிலையில் ஆற்றலிடைவெளி வெப்பநிலை அதிகரிக்கக் குறைந்து $T=T_c$ என்ற வெப்பநிலையில் சுழியாகிவிடுகின்றது. ஆனால் மின்கடத்தாப் பொருளில், நிறைவுற்ற இணைதிற எலக்ட்ரான் ஆற்றல் நிலைகளுக்கும், நிறைவுறா வெற்றுஇடக் கடத்து எலக்ட்ரான் ஆற்றல் நிலைகளுக்கும் உள்ள ஆற்றல் இடைவெளி, ஏறக்குறைய வெப்பநிலையைச் சார்ந்திருப்பதில்லை.





(அ) இயல்பு எலக்ட்ரான் (ஆ) மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்

படம்:6.14 பெர்மி மட்டத்தில் மீக்கடத்தும் நிலையில் ஆற்றலிடைவெளி

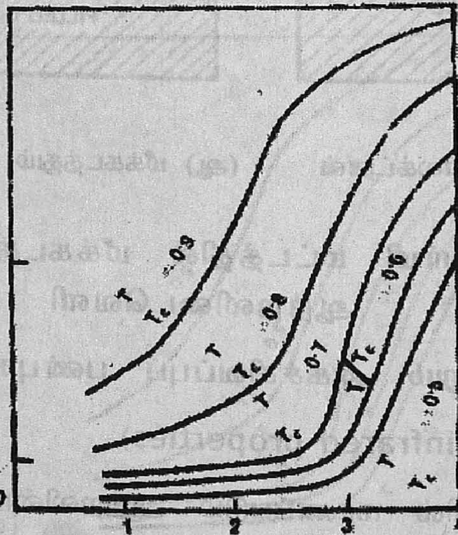
நுண்ணலை மற்றும் அகச்சிவப்புப் பண்புகள்

(Microwave and infrared properties)

மீக்கடத்திகளில் காணப்படும் ஆற்றலிடைவெளி, இவ்வாற்றல் இடைவெளிக்கும் குறைவான ஆற்றலைக் கொண்டுள்ள போட்டான்களை மீக்கடத்திகள் உட்கவர்ந்து, கிளர்ச்சியுற்று இயல்பு நிலைக்கு நிலைமாற்றம் பெறமுடியாது என்று தெரிவிக்கின்றது.

அப்போது உட்கிரகிப்பு இல்லாததால் மீக்கடத்தியின் மீது விழும் ஒளித்துகள்கள் எல்லாம் எதிரொளிக்கப்படுகின்றன. எதிரொளிக்கப்படும் போட்டான்களுக்கும், விழும் போட்டான்களுக்கும் உள்ள தகவு எதிரொளிப்புக் குணகம் எனப்படும். ஒளித்துகள்கள் மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களால் உட்கிரகித்துக் கொள்ளப்படுமெனில் எதிரொளிப்புக் குணகம் ஒன்றைவிடக் குறைவான மதிப்புடையதாக இருக்கும். அப்போது அதன் மின்தடையின் மதிப்பில் மாற்றம் ஏற்படுகின்றது. எனவே மீக்கடத்தியின் மின்தடையில் ஏற்படும் மாற்றத்திற்கும், ஒளித்துகளின் எதிரொளிப்புக் குணகத்திற்கும் ஒரு நெருக்கமான தொடர்பிருக்கின்றது எனக்கூறலாம்.

சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியின் மின்தடை சுழி. தாக்கும் ஒளித்துகளின் ஆற்றல், அம்மீக்கடத்தியின் ஆற்றலிடை வெளியைவிடக் குறைவாக இருக்கும்போது, முழுதும் எதிரொளிக்கப்படுகின்றது. அதாவது அதன் மின்தடையில் மாற்றம் ஏற்படுவதில்லை. ஆனால் ஆற்றலிடைவெளிக்குச் சமமான ஆற்றலுடைய ஒளித்துகளைக் கொண்டு தாக்கினால் அதன் எதிரொளிப்புக் குணகத்திலும், மின்தடையிலும் மாற்றம் தலைகாட்டுகின்றது. மீக்கடத்தியின் வெப்பநிலை அதிகரிக்க, $T = T_c$ என்ற வெப்பநிலையை எட்டும்வரை மின்தடை முதலில் மெதுவாகவும் பின்னர் விரைவாகவும் அதிகரிக்கின்றது.



படம். 6.15. வெவ்வேறு வெப்பநிலைகளில் மீக்கடத்தியின் புறப்பரப்பு மின்தடையும், போட்டானின் ஆற்றலும்

வெப்பநிலை அதிகரிக்க ஆற்றலிடைவெளி குறைகின்றது. எனவே உயர் வெப்பநிலையில் ($0<T<T_c$) குறைந்த ஆற்றலுடைய போட்டானாலும் மின்தடை அதிகரிக்கக்கூடியதாக இருக்கின்றது. இது சாதாரணமாக நிகழும் எலக்ட்ரான்களின் வெப்பக் கிளர்ச்சியால் தூண்டப்பட்டு, ஆற்றலிடைவெளியைக் கடந்து இயல்பு எலக்ட்ரான்களாக மாற்றம் பெறுவதால் ஏற்படுகின்றது.

6.6. இலண்டனார் கொள்கை (London's Theory)

மீக்கடத்திகளின் காந்தப்பண்புகளை, அதை ஒரு முழுமையான டயா காந்தமாகக் கொண்டு விளக்கலாம். மெய்ஸ்னர் விளைவின்படி, காந்தப்பாயங்கள் மீக்கடத்திகளால் வெளித்தள்ளப்படுகின்றன. எனினும் கடத்தியின் புறப்பரப்பின் வழியான காந்தப்பாயங்களின் ஊடுருவலை இது விளக்கக் கூடியதாக இல்லை. புறப்பரப்பிலிருந்து எந்த ஆழம்வரை காந்தப் பாயங்களின் ஊடுருவல் நிகழுமோ அதை ஊடுறுவல் ஆழம் (penetration depth) என்பர். இது பொருளில் அணுவிடைத் தொலைவைவிட மிகவும் அதிகமாக இருக்கின்றது. மேலும் மென்படலங்களில் இப்பண்பை முழுமையாக விளக்க முடியவில்லை. இதனால் இலண்டன் சகோதரர்கள் (F.London மற்றும் H.London) மீக்கடத்தியின் மேற்பரப்பிற்குள் காந்தப்புலம் ஊடுறுவ வல்லதாக இருக்கின்றது என்று கற்பித்தார்கள். இதை நிறுவுவதற்கு, ஓம் விதி தொடர்பான மின்னியக்கவியல் சமன்பாட்டைத் திருத்தி அமைத்துக் கொண்டனர். $E = 0$, $B = 0$ என்ற இரு நிபந்தனைகளையும் ஒருசேர விளக்க முடியாததால், மீக்கடத்தியின் மின்னியக்கவியல் பண்புகளை விளக்க மேக்ஸ்வெல் சமன்பாடு போதுமானதாக இல்லை எனலாம். அதனால் ஓம் விதியில் திருத்தமே சரியானது என முடிவு செய்தனர். இதைக்கொண்டு மீக்கடத்தும் பண்பை விளக்க இலண்டனார் இரு புலச் சமன்பாடுகளை வருவித்தனர்.

வெப்பநிலையைப் பொறுத்து மீக்கடத்திகளின் என்ட்ரோபியில் காணப்படும் மாற்றம் நமக்கு இருவகையான எலக்ட்ரானகள் - இயல்பு எலக்ட்ரான்கள், மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்கள் - இருப்பதைத் தெரியப்படுத்தியுள்ளன. நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்குக் கீழ் இயல்பு எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை குறைய, அதே அளவிற்கு மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்கள் அதிகரிக்கின்றன. எனவே எந்தவொரு வெப்பநிலையிலும் இயல்பு எலக்ட்ரான்கள் மற்றும் மீக்கடத்து எலக்ட்ரான்கள் இவற்றின் கூடுதல், இயல்பு நிலையில் கடத்து

எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கைக்குச் சமமாக இருக்கின்றது என்ற அடிப்படையில் இலண்டனார் தன்கொள்கையை அமைத்துக் கொண்டார். மேலும் மீக்கடத்து எலக்ட்ரான்கள் அணித்தளத்தால் சிதறலுக்கு ஆளாவதில்லை, மாறாகச் செயல்படுத்தப்படும் மின்புலத்தால் தொடர்ந்து முடுக்கப்படுகின்றன என்றும் சார்பிலா சுழிவெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியில் மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்கள் மட்டுமே இருக்கின்றன என்றும், வெப்பநிலை அதிகரிக்க இயல்பு எலக்ட்ரான்களின் செறிவு அதிகரித்து $T=T_c$ என்ற வெப்பநிலையில் அனைத்து எலக்ட்ரான்களும் இயல்பு எலக்ட்ரான்களாகி விடுகின்றன என்றும் கொள்ளப்பட்டுள்ளன.

இலண்டனார் முதல் சமன்பாடு

மீக்கடத்திகளில் ஏற்படும் மொத்த மின்னோட்டம்(i) அதிலுள்ள இயல்பு மற்றும் மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களின் மின்னோட்டத்தின் கூடுதலாகும். எனவே

$$i = i_N + i_s$$

$T = T_c$ என்ற வெப்பநிலையில், மீக்கடத்தும் நிலை மறைவதால் $i = i_N$. மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களுக்கு மின்தடை ஏதுமில்லை என்பதால் செயல்படுத்தப்படும் மின்புலத்தால் முடுக்கம் பெறுகின்றது.

$$-e.E = m\, dv/dt$$

என்ற சமன்பாட்டால் இதைக் குறிப்பிடலாம். n_s என்பது ஓரலகுப் பருமனில் உள்ள மீக்கடத்து எலக்ட்ரான்களின் எண்ணிக்கை என்றும், V என்பது மீக்கடத்து எலக்ட்ரான்களின் சராசரித் திசைவேகம் என்றும் கொண்டால், மின்னோட்டச் செறிவு

$$J_s = -n_s e v \qquad (6.12)$$

இதைப் பகுத்தால்

$$dJ_s/dt = -n_s e\, dv/dt$$

இதில் dv/dt-ன் மதிப்பைப் பதிலீடு செய்தால்

$$dJ_s/dt = n_s e^2/m \ (E) = E/\mu_o\lambda^2$$

இதில் $\mu_o\lambda^2 = m/n_s e^2$ எனவே

$$E = \mu_o\lambda^2\,(dJ_s/dt) \qquad (6.13)$$

இதில் λ என்பது மீக்கடத்தியின் ஒரு சிறப்பியல்பைக் கூறும் ஓர் இயற்பியல் பண்பாகும். இச்சமன்பாடு இலண்டனார் முதல் சமன்பாடு எனப்படுகின்றது. இது மீக்கடத்திகளின் சுழிமின்தடையைத் தெரிவிக்கக் கூடியதாக இருக்கின்றது. E = o என்ற போது $dJ_s/dt=o$ அல்லது J_s = மாறிலி. இது மீக்கடத்தும் பண்பைக் குறிக்கின்றது. இயல்பு எலக்ட்ரான்களாலான மின்னோட்டம்

$J_N = \sigma_E$

E= o எனில் J_N = o, இது பொருளின் இயல்பு நிலைப் பண்பிற்கேற்ப இருக்கின்றது.

இலண்டனார் இரண்டாவது சமன்பாடு

முதல் சமன்பாட்டிலிருந்து பெற்ற J_sன் மதிப்பை மேக்ஸ்வெல் சமன்பாட்டில் பதிலீடு செய்து பெறப்பட்ட சமன்பாடே இலண்டனார் இரண்டாவது சமன்பாடாகும். மேக்ஸ்வெல் சமன்பாட்டின்படி

$$\text{Curl } E = \nabla \times E = - dB / dt$$

முதல் சமன்பாட்டிலிருந்து,

$$\nabla \times dJ_s/dt = \nabla \times (n_s e^2 / m) \ (E)$$

$$= (-n_s e^2 / m) \ dB / dt$$

இத்தொடர்பைத் தொகையாக்கத்திற்கு உட்படுத்தினால்

$$\nabla \times J_s = (-n_s e^2 / m) \ (B-B_o)$$

இதில் B_o என்பது தொகையாக்கத்தினால் விளைந்த ஒரு மாறிலியாகும். தொடக்க நிலையில் அதாவது t=o என்ற நிலையில் இருக்கும் காந்தப்பாயச் செறிவாகும். மெய்ஸ்னர் விளைவு, மீக்கடத்தியின் உட்பகுதியில் காந்தப்புலச் செறிவு இருப்பதைத் தவிர்க்கின்றது என்பதால் B_o=o என்று எடுத்துக் கொள்ளலாம். எனவே

$$\nabla \times J_s = (-n_s e^2/m) \ B = -B/\mu_o\lambda^2 \qquad (6.14)$$

இதில் $\mu_o\lambda^2 = m/n_s e^2$

இது இலண்டனாரின் இரண்டாவது சமன்பாடு எனப்படுகின்றது. இது மெய்ஸ்னர் விளைவு மற்றும் மென்படலத்தில் காந்தப்பாயங்களின் ஊடுருவலுக்கான விளக்கத்தைத் தருகின்றது.

மெய்ஸ்னர் விளைவிற்கான விளக்கமும் காந்தப் பாயங்களின் ஊடுருவலும்

சமன்பாடு (6.14)ன் படி

$$\nabla \times J_s = (-n_s e^2 /m)\ B = - B/\mu_o \lambda^2$$

∇ செயலியை மீண்டும் உட்புகுத்தினால்

$$\nabla \times \nabla \times J_s = (-n_s e^2 / m)\ \nabla \times B$$

ஆனால் வெக்டார் சமன்பாட்டு விதிப்படி

$$\nabla \times \nabla \times A = \text{grad. div } A - \nabla^2 A$$

எனவே மேற்கண்ட சமன்பாட்டை

$$\nabla (\nabla . J_s) - \nabla^2 J_s = (-n_s e^2/m)\ \nabla \times B$$

எனக் குறிப்பிடலாம். ஆனால் $\nabla . J_s = o$ என்பதால்

$$\nabla^2 J_s = (n_s e^2 /m)\ \nabla \times B$$

(6.15)

மீண்டும் மேக்ஸ்வெஸ் சமன்பாட்டின் படி

$$\nabla \times B = \mu_o J + \mu_o (dD / dt)$$

dD/dt என்பது இடப்பெயர்வினால் விளையும் மின்னோட்டமாகும் (displacement current). J என்பது மீக்கடத்தும் மற்றும் இயல்பு எலக்ட்ரான்களாலான மின்னோட்டச் செறிவின் கூடுதல் ($J = J_s + J_N$). மீக்கடத்தியில் J_N, dD/dt இவற்றை நாம் புறக்கணித்து நிகழ்வை எளிமையாக்கிக் கொள்ளலாம்.

$$X B = \mu_o J_s \quad (6.16)$$

இம்மதிப்பைச் சமன்பாடு (12.15)ல் பதிலீடு செய்ய

$$\nabla^2 J_s = (n_s e^2/m)\ .\ \mu_o J_s = J_s / \lambda^2 \quad (6.17)$$

ஒரு பரிமாண முள்ள அமைப்பில்

$$d^2 J_s / dx^2 = J_s / \lambda^2$$

இச்சமன்பாட்டின் தீர்வாக

$$J_s = a\ e^{x/\lambda} + b e^{-x/\lambda}$$

இதில் a,b ஆகிய இரண்டும் மாறிலிகளாகும், x என்பது புறப்பரப்பிலிருந்து அளவிடப்படும் ஆழமாகும். மேற்குறிப்பிட்டதீர்வு ஒரு பொதுத் தீர்வாகும். இதில் முதல் பகுதி x அதிகரிக்க J_s அதிகரிக்கின்றது என்று தெரிவிக்கின்றது. இது உண்மை நிகழ்விற்கு நேர் புறம்பானது என்பதால், இதைத் தவிர்த்துக் கொள்ள a-ன் மதிப்பைச் சுழியாக்கிக் கொண்டுவிடலாம்.

எனவே

$$J_s = b\, e^{-x/\lambda}$$

x = o அதாவது புறப்பரப்பில் $J_s = J_o$ (பெருமம்) என்றால் $J_o = b$ எனவே

$$J_s = J_o\, e^{-x/\lambda}$$

என்று இறுதியாக நிறுவலாம். $x = \lambda$ எனில்

$$J_s/J_o = 1/e$$

அதாவது λ என்ற உறுப்பு நீளத்திற்குரிய பரிமாணத்தைப் பெற்றுள்ளது. அதனால் இதை ஊடுருவல் ஆழம் (penetration depth) என்பர். ஊடுருவல் ஆழம் என்பது புறப்பரப்பிலிருந்து மீக்கடத்தியின் உட்புறம் செல்லச் செல்ல எப்புள்ளியில் மின்னோட்டச் செறிவு, புறப்பரப்பு பெரும மின்னோட்டச் செறிவிற்கு (1/e)-ன் மடங்காக இருக்கின்றதோ அப்புள்ளியின் ஆழம் என்று வரையறை செய்யலாம்.

இதே கருத்தை நாம் சமன்பாடு (6.16)ஐக் கொண்டும் பெறமுடியும். இதில் ∇ செயலியைச் செயல்படுத்த

$$\nabla \times \nabla \times B = \mu_o (\nabla \times J_s)$$

வெக்டார் சமன்பாட்டு விதிப்படி

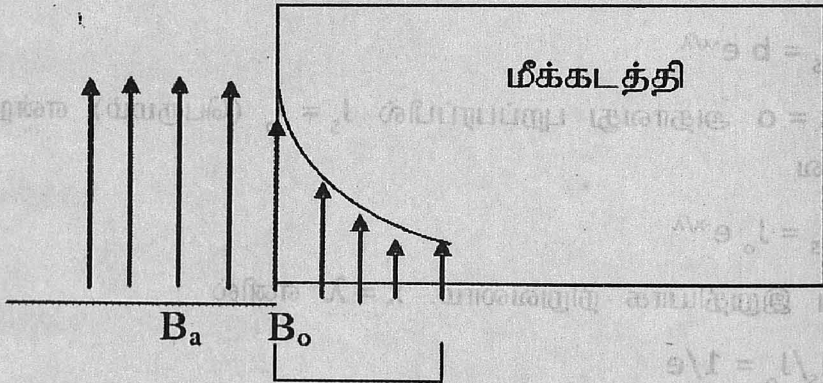
$$\nabla (\nabla . B) - \nabla^2 B = \mu_o (\nabla \times J_s)$$

$\nabla . B = o$ என்பதாலும், $\nabla \times J_s = -B / \mu_o \lambda^2$ என்பதாலும், ஒரு பரிமாணமுள்ள அமைப்பிற்கு

$$d^2B / dx^2 = B / \lambda^2$$

இதன் பொதுத் தீர்வு $B = a\ e^{x/\lambda} + b\ e^{-x/\lambda}$. இதில் x என்பது மீக்கடத்தியின் புறப்பரப்பிலிருந்து ஆழமாகும். x-ன் மதிப்பு அதிகரிக்க B-ன் மதிப்பு தாழ்ந்து போகும் என்பதால் a = o எனலாம். எனவே $B = be^{-x/\lambda}$

x = o, புறப்பரப்பெனில் B-ன் மதிப்பு பெருமம். இதை B_o எனக் கொண்டால் $b = B_o$ அல்லது $B = B_o\ e^{-x/\lambda}$ (6.19)



படம்:6.16 மீக்கடத்தியில் காந்தப்புலம் ஊடுருவும் நெறிமுறை

$x = \lambda$ எனில் $B = B_o/e$. எனவே மீக்கடத்தியின் புறப்பரப்பு காந்தப் பாயத்தின் மதிப்பில் 1/e அளவு எவ்வாழத்தில் இருக்கின்றதோ அவ்வாழத்தை ஊடுறுவல் ஆழம் என்றும் கூறலாம்.

இம்மதிப்பு $300 - 5000 \times 10^{-10}$மீ நெடுக்கையில் இருக்கின்றது என்றறிருந்துள்ளனர். எனவே இலண்டனார் சமன்பாடுகள், மின்னோட்டம், மற்றும் காந்தப்புலத்தின் ஊடுருவலை புறப்பரப்பில் மிகக் குறுகிய எல்லைக்கு உட்பட்டு அனுமதிக்கின்றன என்று கூறலாம். மேலும் கடத்தியின் உள்ளகப் பகுதிகளில் இவை மறைந்து மெய்ஸ்னர் விளைவையும் உறுதிப்படுத்துகின்றன.

மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களின் செறிவு $n_s = 10^{28}$ என்றும், m என்பது ஒரு தனி எலக்ட்ரானின் நிறை என்றும் கொண்டு ஊடுறுவல் ஆழத்தை $\lambda\sqrt{m/\mu_o n_s e^2}$ என்ற தொடர்பால் மதிப்பிட $\lambda = 200$ x

10^{-10}மீ என்று பெறலாம். இது λ-மதிப்பின் தாழ்ந்த வரம்பு மதிப்பாக இருக்கலாம்.

ஊடுருவல் ஆழம் λ-ஆன தொடர்பில் n_s தோன்றியிருப்பதால், λ வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப மாறுபடும் தன்மையது என்று கூறலாம். $T > T_c$ என்ற நிலையில் $n_s = 0$, T=0K என்றபோது n_s பெரும மதிப்புடையதாக இருக்கின்றது. எனவே λ-ன் மதிப்பு சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் குறைவானதாகவும், $T = T_c$ என்ற வெப்பநிலையில் அனந்தமாகவும் உள்ளது.

$$\lambda(T) = \lambda(0) / \sqrt{1-(T/T_c)^4} \qquad (6.20)$$

என்ற தொடர்பிற்கு ஏற்ப λ(T) மாறுபடுவதாகச் சோதனை முடிவுகள் தெரிவித்துள்ளன.

பிப்பார்டு என்பார் புறக்காந்தப்புலச் செறிவிற்கும் ஊடுருவல் ஆழத்திற்கும் உள்ள ஒரு தொடர்பை இது போல நிறுவியுள்ளார்.

$$\lambda(B) = \lambda(0)\,[1+0.02\,(B/B_c)^2] \qquad (6.21)$$

6.7. உயர் அதிர்வெண் நெடுக்கையில் மீக்கடத்தும் தன்மை

இதுகாறும் ஒருதிசை மின்புலத்தில் மீக்கடத்திகளின் பண்புகளைப் பற்றிப் பார்த்தோம். இனி உயர் அதிர்வெண்ணுடன் கூடிய நுண்ணலைகள் மீக்கடத்தியின் ஊடாக எங்ஙனம் ஊடுபரவிச் செல்கின்றது எனப்பார்ப்போம். மேக்ஸ்வெல் சமன்பாடுகளின்படி

$$\nabla \times B = \mu_o (J_S + J_N) + \mu_o\, dD/dt$$

(6.13)ன் படி $dJ_s/dt = (n_s e^2/m)E = E/\mu_o \lambda^2$

மாறுதிசை காந்தப்புலமாக இருப்பதால், செயல்படும் காந்தப்புலமும், மின்னோட்டமும் சைன் சார்பில் மாறுபடுவதாகக் கொள்வோம். எனவே

$$B = B_o e^{i\omega t}\,;\; J_s = J_o e^{i\omega t}$$

J_sஐப் பகுப்பாக்கம் செய்ய

$$dJ_s / dt = i\omega J_s = E / \mu_o \lambda^2$$

அல்லது $J_s = -iE / \mu_o \omega \lambda^2$ (6.22)

மேலும் இடப்பெயர்ச்சி மின்னோட்டத்தை

$D = D_o e^{+i\omega t}$

என்று குறிப்பிட்டால்,

$dD/dt = i\omega D = +i\omega\varepsilon E$

ε என்பது பொருளின் மின்கடத்தாப் பொருள் மாறிலியோடு தொடர்புடையது.

இயல்பு எலக்ட்ரான்களாலான மின்னோட்டச் செறிவு

$J_N = \sigma_N E$ என்பதால்

$\nabla \times B = \mu_o [\sigma_N + i\omega E - i / \mu_o \omega\lambda^2].E$

∇ செயலியை இருமருங்கும் செயல்படுத்த

$\nabla \times \nabla \times B = \mu_o [\sigma_N + i\omega E - i / \mu_o \omega\lambda^2] \nabla \times E$

$\nabla \times E = -dB/dt = i\omega B$ என்பதால்

முன்பு பின்பற்றிய அதே வழிமுறையின்படி

$\nabla^2 B = [\sigma_N + i\omega\varepsilon - i / {}_o\omega\lambda^2] (i\omega\mu_o B)$

$\nabla^2 B = (1/\lambda^2 - \omega^2\mu_o\varepsilon + i\omega\mu_o\sigma_N) B$

இச்சமன்பாட்டின் பொதுத் தீர்வை $B = B_o e^{-i(\omega t - kr)}$ எனக் குறிப்பிடலாம்.

$$k^2 = \omega^2\mu_o\varepsilon - i\omega\mu_o\sigma_N - 1/^2 \quad (6.23)$$

$\nabla^2 B + k^2 B = o$

இதில் மூன்றாவது உறுப்பு மீமின்னோட்டத்தால் ஏற்படும் புல ஊடுருவலையும், இரண்டாவது உறுப்பு சுழல்இயக்கத் தூண்டு மின்னோட்டத்தால் ஏற்படும் புல ஊடுருவலையும் முதலாவது உறுப்பு இடப்பெயர்ச்சி மின்னோட்டத்தால் ஏற்படும் புல ஊடுருவலையும் குறிப்பிடுகின்றன. தாழ்ந்த அதிர்வெண் நெடுக்கையில் ω-ன் மதிப்புக் குறைவாக இருப்பதால்,

$\nabla^2 B = B / \lambda^2$

இது இலண்டனார் முடிவோடு ஒன்றியது.

அகச்சிவப்பு அதிர்வெண் நெடுக்கையில் சுழல் இயக்கத் தூண்டு மின்னோட்டத்தின் பங்களிப்பு மேலோங்குகின்றது.

$$k = (\omega\mu_o\sigma N)^{1/2} \qquad (6.24)$$

எனவே அகச்சிவப்புப் பகுதியில் மீக்கடத்தியின் பண்பு அதன் σ_N மதிப்பால் தீர்மானிக்கப்படுகின்றது. மீக்கடத்தும் நிலையிலிருந்து இயல்பு நிலைக்கு மாற்றம் பெற $1/\lambda^2 - k(\omega\mu_o\sigma_N) = o$

அல்லது $\omega = n_s e^2/m\sigma_N$ (6.25)

இதன் மதிப்பு 10^{11}/வி என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது. எனவே உலோகங்களில் இயல்பு – மீக்கடத்தும் நிலையிடை நிலைமாற்றம் சுழல் இயக்கத்தூண்டு மின்னோட்டத்திற்கான புறத்தளப்பாய்வாழம், (skin depth) இலண்டனார் ஊடுருவல் ஆழத்திற்குச் சமமாக இருக்கும்போது தோன்றுகின்றது. δ என்பது புறத்தளப் பாய்வாழம் எனில்

$$\delta = \sqrt{2/\omega\sigma_N\mu_o} \qquad (6.26)$$

எனவே

$$\lambda^2/\delta^2 = \lambda^2 \mu_o\omega\sigma_N/2 = \tfrac{1}{2}(J_N/J_S) \qquad (6.27)$$

உயர் அதிர்வெண்ணிற்கு δ மிகவும் குறைவு λ மிகவும் அதிகம். அதாவது $J_N > J_S$ என்றாகின்றது. எனவே உயர் அதிர்வெண்ணில் மீக்கடத்திகள் இயல்புநிலை கடத்திகளைப்போலச் செயல்படுகின்றன எனலாம்.

இலண்டனார் சமன்பாடு, மீக்கடத்திகள் தொடர்பான சில சோதனை முடிவுகளை விளக்கக்கூடியதாக இருக்கின்றது. எனினும் விளக்கம் சமன்பாடுகளின் கலவையாலானதாக இருப்பதுடன், மீக்கடத்தியின் இயற்பியலை முழுமையாக வெளிப்படுத்தவில்லை. குறிப்பாக மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான், இயல்பு எலக்ட்ரானைப் போல மின்தடையை உணராததற்கான காரணம் இல்லை. இது ஓரளவு BCS-கொள்கையில் தெளிவுபடுத்தப்படுகின்றது.

6.7 BCS-கொள்கை

மீக்கடத்திகளின் சிறப்பியல்புகளான $E = o$, $B = o$ என்ற நிபந்தனைகளை இலண்டனார் சமன்பாடுகள் விளக்கினாலும், அதன் பின்னணியில் உள்ள எலக்ட்ரான் தொடர்பான நிகழ்வுகளைப் பற்றி ஏதும் தெரிவிக்கக் கூடியதாக இல்லை. இக்குறைபாட்டை அகற்றும் பொருட்டு பார்டீன், கூப்பர் மற்றும் ஷெரிபர் (Bardeen, Cooper

Schrieffer) ஆகியோர் ஒன்றிணைந்து 1957-ல் குவாண்டம் கொள்கையின் அடிப்படையில் ஒரு கொள்கையை நிறுவினார்கள். இதுவே அக்கொள்கையை நிறுவிய அறிவியலாரின் பெயரிலேயே BCS-கொள்கை என்று சுருக்கப் பெயரால் சிறப்புப் பெற்றது.

தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் பல எலக்ட்ரான்கள் ஒரே குவாண்டம் நிலையில் அமைகின்றன. இது உண்மையில் புள்ளியியல் மற்றும் இயக்கவியல் அடிப்படையில் நடைமுறைச் சாத்தியமில்லாதது. புள்ளியியல் கொள்கையில் பெர்மியான்களான எலக்ட்ரான்கள் தனித்தனி குவாண்டம் நிலையில் அமைகின்றன. அதனால் அவைகளுக்கிடையேயான விலகுவிசை அவற்றை விலகியிருக்குமாறு செய்கின்றது. உலோகங்களில் இந்த விலகு விசை, திரையிடப்படும் பல்வேறு காரணங்களினால் அவ்வளவு வலுவாக இருப்பதில்லை. BCS–கொள்கையின்படி, இக்குறைபாடுகள் சில இணக்கமான சூழ்நிலைகளில் தவிர்க்கப்படுகின்றன. இதுபோன்றதொரு சூழ்நிலையில் ஒருசில ஆற்றல் நெடுக்கையில் எலக்ட்ரான்கள் ஒன்றையொன்று கவர்ந்து கொள்கின்றன என்றும், அதனால் அவை இணை இணையாக இருக்கின்றன என்றும் கூறலாம்.

BCS கொள்கைப்படி, உலோகத்திலுள்ள கடத்து எலக்ட்ரான்களுக்கிடையே, போனான்களை இடைஊடகமாகக் கொண்டு விளையும் ஒருவகையான கவர்ச்சிவிசையினால் மீக்கடத்தும் தன்மை ஏற்படுகின்றது. இதனால் எலக்ட்ரான்கள் பிணைவுற்ற இணையாக இருக்கின்றன. இதைக் கூப்பர் இணை (Cooper pair) என்று அழைக்கின்றார்கள். கூப்பர் இணை ஒரு போசானாகும். அதாவது அவற்றின் தற்சுழற்சி $h/2\pi$-ன் முழு எண் மடங்காக உள்ளது. இவை பௌலியின் தவிர்க்கை விதியால் கட்டுப்படுத்தப்படுவதில்லை என்பதால் பல எலக்ட்ரான் இணைகள் ஒரே ஆற்றல் நிலையில் இருக்கும் வாய்ப்பைப் பெறுகின்றன.

கூப்பர் இணை படிக அணித் தளத்தில் எவ்விதச் சிதறலுக்கும் ஆளாகாமல் ஊடுருவிச் செல்லும் தகுதி படைத்ததாக விளங்குகின்றது என்பது அதன் தனிச் சிறப்பாகும். இதை நாம் முழுமையாக அறிந்து கொள்ள வேண்டுமெனில் எலக்ட்ரான் - படிக அணித்தளம் - எலக்ட்ரான் இவைகளுக்கிடையேயான இடையீட்டுச் செயலைப் பற்றி ஓரளவு தெரிந்து கொள்ள வேண்டும். இவ்விடையீட்டுச் செயலை

எலக்ட்ரான் - போனான் இடைவினை என்றும் குறிப்பிடுவர். இவ்வகையான இடையீட்டுச் செயல், எலக்ட்ரான்களின் வெப்ப ஆற்றல், எலக்ட்ரான் - படிக அணித்தள அதிர்வுகள் அல்லது போனான் இடையீட்டுச் செயலின் ஆற்றலை விடக் குறைவாக இருக்கும்போது குறிப்பிடும்படியாக இருக்கின்றது.

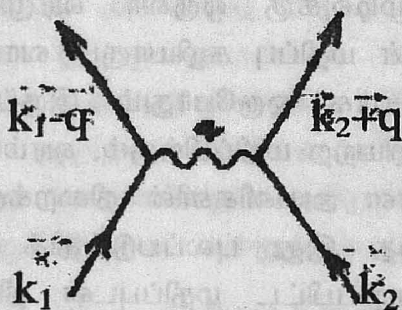
BCS – கொள்கைக்கு அடிப்படையாக இருப்பது சம அணு எண்ம் விளைவு மற்றும் மீக்கடத்திகளின் வெப்பக் கொள்திறனில் ஏற்படும் மாற்றம் தொடர்பான சோதனை முடிவுகளே.

சம அணுஎண்ம விளைவுப்படி $T_cM^{1/2}$ = மாறிலி. இதிலிருந்து மீக்கடத்தும் நிலைமாற்றத்தில், அயனிகளின் இயக்கம் மற்றும் படிக அணித்தள அதிர்வுகள் அல்லது போனான்களின் ஈடுபாடு உள்ளது என்ற முடிவுக்கு ஒருவர் வரமுடியும். M-ன் மதிப்பு அனந்தமானால் T_c-ன் மதிப்பு சுழியாகும் வாய்ப்பைப் பெறுகின்றது. T_c-ன் மதிப்பு சுழியாக ஒருபோதும் இருப்பதில்லை. பெயர்ச்சி வெப்பநிலையின் சுழியற்ற மதிப்பிற்கும், வரம்பிற்குட்பட்ட குறிப்பிட்ட மதிப்பைப் பெற்றுள்ள அயனிகளின் நிறைக்கும் ஒரு நெருக்கமான தொடர்பு இருப்பதை இது புலப்படுத்திக் காட்டுகின்றது. படிக அணித்தளத்தில் குறிப்பிட்ட மதிப்புடன் நிறையுள்ள அயனிகள், ஏற்படுத்தும் அதிர்வினால் போனான்களைத் தோற்றுவிக்கின்றன. பார்டீன் மற்றும் ப்ரோலிக் (Frohlick) என்பார் இதுபற்றித் தெரிவித்துள்ளனர்.

எலக்ட்ரான் - படிக அணித்தளம் - எலக்ட்ரான் இடைவினை

ஒரு எலக்ட்ரான் படிக அணித்தளத்தின் ஊடாகச் செல்லும் போது, படிக அணித்தளத்தின் அமைப்பை உருவேறுபடுத்துகின்றது. படிகத்தளமோ எலக்ட்ரான் மீது கூலும் விசையினால் இடைவினை புரிகின்றது. இது மீட்சிவிசைபோல் செயல்படுகின்றது. அதனால் படிக அணித்தள உருக்குலைவு, அலைவு இயக்கத்திற்கு உட்பட்டதுபோல தொடர்ந்து உருவேறுபாட்டையே அலைவியக்கமாகப் பெறுகின்றது. அதாவது படிகத் தளத்திலுள்ள கனமான அயனிகளை, மெதுவான அலைவியக்கத்திற்குக் கட்டாயப்படுத்துகின்றது. ஆனால் இந்த அலைவியக்கம் ஓய்வுறுவதற்கு வெகுமுன்பாகவே எலக்ட்ரான் மின்தடை ஏதுமின்றி மிகவிரைவாகக் கடந்து சென்றுவிடுகின்றது. இதற்கிடையில் அப்பகுதியைக் கடக்க முயலும் அடுத்த எலக்ட்ரான்,

ஓர் கவர்ச்சி விசைக்கு உட்படுகின்றது. இக்கவர்ச்சி விசையினால் இரண்டாவதாக வந்த எலக்ட்ரானின் ஆற்றல் குறைகின்றது. எலக்ட்ரான்களுக்கிடையேயான விலகுவிசை குறைவாக இருக்கின்றது. ஏனெனில் கூலும் விசையாலான விலக்கம் உடனடி நிகழ்வாகவும், படிக அணித்தள உருக்குலைவின் மூலம் தொடர்புபடுத்தப்படும் கவர்ச்சியோ, காலத்தால் குறைவதாகவும் இருக்கின்றது. அதனால் மிக மெல்லிய படிகத்தள உருக் குலைவுகூட எலக்ட்ரான்மீது கவர்ச்சிவிசை செயல்படுத்தக் கூடியதாக இருக்கின்றது. மொத்த விசை கவர்ச்சியாக இருப்பதால், இரு எலக்ட்ரான்கள் படிகத்தள உருக்குலைவின்மூலம் ஒன்றிணைகின்றன. இதையே கூப்பர் இணை என்பர்.



படம்.6.17 போனான் மூலம் நிகழும் எலக்ட்ரான் - எலக்ட்ரான் இடைவினை.

படிக அணித்தளத்தின் அதிர்வாற்றல் எல்லா மதிப்புகளையும் பெற்றிருப்பதில்லை. மாறாகச சில குவாண்டம் மதிப்புகளையே பெற்றிருக்கின்றது. குவாண்டம் ஆற்றல் மதிப்புடைய அதிர்வாற்றலை போனான் என்பது வழக்கம். எனவே எலக்ட்ரான் - படிகத்தள இடையீட்டுச் செயலை படிக அணித்தளத்தால் தொடர்ந்து உமிழ்ந்தும், உட்கிரகித்தும் கொள்ளப்படும் போனான்கள் எனக் கருதலாம். இவற்றைப் பொய்மைப் போனான்கள் (Virtual phonon) என்பர். அதாவது இவை உண்மையில் உண்மைபோல் கொள்ளத்தக்கனவாகும். ஏனெனில் ஐயப்பாட்டுக் கொள்கையின் அடிப்படையில் குறுகியகால வாழ்வுடைய இவைகள் ஆற்றல் மாறாக் கோட்பாட்டிற்கு உட்படுவதில்லை. படிகத்தளத்தில் கடந்து செல்லும் இரு எலக்ட்ரான்கள் இப் பொய்மை போனான்களை பரிமாற்றம் செய்து கொள்வதால் ஒன்றோடொன்று பிணைவுற்றுத்

தொடர்புடையவைகளாகின்றன. BCS கொள்கையில் இந்த எலக்ட்ரான் இணைகளே மீக்கடத்தும் தன்மைக்கு அடிப்படைக் காரணம் எனக் கூறப்பட்டுள்ளது.

நேர் மின்னூட்டங் கொண்ட அயனியொன்றை எலக்ட்ரான் நெருங்கும் போது கூலும் இடைவினை புரிகின்றது. விளையும் கவர்ச்சி விசையினால் அயனி இயக்கம் தூண்டப்பெற, படிக அணித்தளம் உருக்குலைவைப் பெறுகின்றது. அயனியின் நிறை குறைவானால் இவ்வுருக்குலைவு அதிக அளவில் இருக்கும். உருக்குலைவுறும் படிக அணித்தளத்தின் பக்கமாக வரும் எலக்ட்ரான் அந்த படிகத்தளத்தோடு வினைபுரிந்து தன் ஆற்றலை இழக்கின்றது. இது ஆற்றலை இழப்பதற்குக் காரணம் முதல் எலக்ட்ரானால் தூண்டப்பட்ட படிக அணித்தள அதிர்வாகும் என்பதால், இதன் மூலம் இரு எலக்ட்ரான்களும் ஒன்றுக்கொன்று இடைவினை ஏற்படுத்திக் கொள்வதாகக் கருதலாம். போனான்களாலான புலவெளியில் எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் குறைவதென்பது அவற்றின் கவர்ச்சி விசையைக் குறிப்பிடுகின்றது. இச்சிறப்புத் தன்மையுடைய வினை தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் போனான் ஆற்றல் ($h\upsilon_v$) எலக்ட்ரான் ஆற்றலைவிட மிகைப்படும் நிலையில் தோன்றுகின்றது. எலக்ட்ரான்கள் இரண்டும் சமமான ஆனால் எதிர்த்திசையில் கோண உந்தத்தையும், தற்சுழற்சியையும் பெற்றிருந்தால், இக்கவர்ச்சி இடைவினை வலிமைமிக்கதாக விளங்குகின்றது.

கூப்பர் இணை

கூலும் விலகு விசையையும் விஞ்சிய கவர்ச்சி விசையினால், அது எவ்வளவு வலிமை குறைந்ததாக இருந்த போதிலும் பெர்மி பரப்பிற்குச் சற்று மேல் நிலையில் இரு எலக்ட்ரான்கள் ஒரு கட்டுற்ற நிலையைப் பெறுகின்றன. கட்டுற்ற இணைந்த எலக்ட்ரான்கள் (கூப்பர் இணை) ஒரு தனித்துகள் போலச் செயல்படுகின்றது. ஒரு கூப்பர் இணையின் ஆற்றல், அதிலுள்ள இரு எலக்ட்ரான்களின் தனித்த நிலை ஆற்றல்களின் கூடுதலைவிடக் குறைவாக இருக்கின்றது. (அணுக்கருவிலுள்ள இரு அணுக்கருத் துகள்களைப் போல). இந்த ஆற்றல் வேறுபாடு கூப்பர் இணையில் உள்ள இரு எலக்ட்ரான்களின் பிணைவாற்றலாகும். ஒரு கூப்பர் இணையைத் தகர்த்துப் பிரிக்க வேண்டுமானால், அதன் பிணைவாற்றலுக்குச் சமமான ஆற்றலை ஊட்ட வேண்டும். இப்பிணைவாற்றல் அடிப்படையில் முன்பு நாம்

கற்பித்த ஆற்றல் இடைவெளிக் கூறுவிற்கு (E_g) சமமாக இருக்கின்றது. இது 10K வெப்பநிலையில் 10^{-3} எ.வோ (எலக்ட்ரான் வோல்ட்) நெடுக்கையில் உள்ளது. இணையின் மொத்த உந்தம் சுழியாக இருக்கும் போதும், சமச்சீர்மையுடனான அலைச்சார்புடன் தற்சுழற்சி ஒற்றை நிலையில் இருக்கும் போதும் பிணைப்பு மிகவும் வலுவானதாக இருக்கின்றது.

கூப்பர், எலக்ட்ரான் இணையின் உருவ அளவைக் கணக்கிட்டுள்ளார். இதன்படி

$$r_o = h\upsilon_F / E_g \qquad (6.28)$$

இதில் υ_F என்பது ஓர் உலோகத்தில் எலக்ட்ரானின் ஒரு தனிச் சிறப்பியல்பு மிக்க வேகமாகும். இதைப் பெர்மி வேகம் என்பர். இது உலோகத்திலுள்ள கடத்து எலக்ட்ரான்களின் செறிவைப் பொருத்திருக்கின்றது. υ_F மற்றும் E_g-ன் சராசரி மதிப்புகளைக் கொண்டு r_o-ன் மதிப்பை 4×10^{-7}மீ. என மதிப்பிட்டுள்ளனர். இது இரு எலக்ட்ரான்களுக்கு இடைப்பட்ட இயல்பான தொலைவின் நெடுக்கையான 10^{-10}மீ. ஐவிட மிகவும் அதிகமாகும். எனவே கூப்பர் இணைகள் ஒன்றோடொன்று மேற்பொருந்தி உள்ளன எனலாம்.

பெயர்ச்சி வெப்பநிலைக்கும் குறைவான வெப்பநிலைகளில் எலக்ட்ரான் - போனான் இடைவினை, எலக்ட்ரான் - எலக்ட்ரான் கூலும் வினையை விட வலிமைமிக்கதாக இருப்பதால், இணைதிற எலக்ட்ரான்கள் எல்லாம் கூப்பர்இணைகளாகச் ஜோடி சேருகின்றன. இந்த இணையாக்கம் சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் முழுமையாகவும், பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் ஒன்றுமில்லாமல் முழுதும் தனித்தும் இருக்கின்றன.

ஆற்றலிடைவெளி

BCS கொள்கைப்படி தனித்த எலக்ட்ரான் நிலைகள் இயல்பு நிலைக்கும், கட்டுற்ற எலக்ட்ரான் நிலைகள் மீக்கடத்து நிலைக்கும் ஆதாரமாயிருக்கின்றன. தனித்த எலக்ட்ரான நிலைக்கும், கட்டுற்ற எலக்ட்ரான் நிலைக்கும் உள்ள ஆற்றல் வேறுபாடு, பெர்மி பரப்பில் காணப்படும் ஆற்றல் இடைவெளியாகத் தோன்றியிருக்கின்றது. இயல்புஎலக்ட்ரான் நிலைகள் பெர்மி பரப்பில் அமைந்துள்ள ஆற்றல் இடைவெளிக்கு மேலாகவும், மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான் நிலைகள்

இவ்விடைவெளிக்குக் கீழாகவும் அமைந்திருக்கின்றன. இந்த ஆற்றல் இடைவெளியானது, குறைக்கடத்திகள் மற்றும் மின் கடத்தாப் பொருட்களில் காணப்படுவதைப் போல மாறாத ஆற்றலிடைவெளியைப் போன்றதில்லை. வெப்ப நிலைக்கு ஏற்ப மாறுபடக் கூடியதாக இருக்கின்றது. ஏனெனில் சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலையில் இணையாக்கம் முழுமை பெறுவதால், ஆற்றல் இடைவெளி பெருமமாக உள்ளது. $T = T_C$ என்ற வெப்பநிலையில் ஆற்றலிடை வெளி மறைந்து விடுகின்றது.

இவ்வாற்றலிடைவெளியில் மீக்கடத்தலுக்குக் காரணமான கூப்பர் இணைகளின் பல கிளர்ச்சி நிலைகள் அமைந்திருக்கின்றன. BCS கொள்கை, மீக்கடத்தும் எலக்ட்ரான்களுக்கு பல அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைகளும், கிளர்ச்சி நிலைகளும், சார்பிலாச் சுழி முதல் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை வரையுள்ள வெப்பநிலை நெடுக்கையில் உள்ளன என்று கற்பிக்கின்றது. இந்த ஆற்றல் நிலைகளில் இருக்கும் கூப்பர் இணைகள், குறிப்பிட்ட அளவு இசைவினையுடன் அல்லது கூட்டுத் தன்மையுடன் கூடிய உறைநிலையில் இருப்பதாகக் கொள்ளப்படும். $T = T_C$ என்ற வெப்பநிலையில் இந்த இசைவினை முறிந்து போகின்றது.

இசைவினைத் தொலைவு (Coherence length)

கூப்பர் இணைகள் படிகத்தளத்தில் ஏற்படும் குறைபாடுகள் மூலம், அவற்றோடு ஆற்றல் பரிமாற்றம் எதையும் மேற்கொள்ளாமல், தங்குதடை ஏதுமில்லாத ஊடகத்தில் செல்வதைப் போல இயங்கிச் செல்கின்றன. அதனால் அதன் கூட்டுத்தன்மை, அது ஒரு குறிப்பிட்ட தொலைவு கடக்கும் வரை பாதுகாக்கப்படுவதாகக் கொள்ளலாம். இதை இசைவினைத் தொலைவு என்று கூறுகின்றார்கள். இது ஏறக்குறைய 10^{-4} செ.மீ என்ற நெடுக்கையில் இருக்கின்றது.

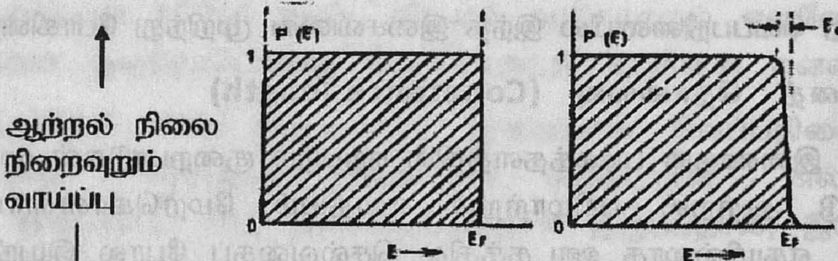
இலண்டனார் ஊடுருவல் ஆழத்திற்கும் (λ_L) இசை வினைத் தொலைவிற்கும் (ξ) உள்ள தகவு ஒரு பின்ன எண்ணாகும்.

$$f = \lambda_L/\xi$$

மென் மீக்கடத்திகளுக்கு $f < 1/\sqrt{2}$ ஆகவும் வன்மீக்கடத்திகளுக்கு $f > 1/\sqrt{2}$ ஆகவும் உள்ளது. அந்த வகையில் f-ன் மதிப்பு தனிச் சிறப்பு மிக்கதாகக் கருதப்படுகின்றது.

BCS கொள்கையின் அடிமட்ட ஆற்றல் நிலைகள்

ஒன்றுக்கொன்று இடைவினை புரியாத பெர்மியான் துகள்களாலான பெர்மியான் வளிமத்தில் நிலைவுற்ற ஆற்றல் நிலைகளை உள்ளடக்கிய பகுதி, அமைப்பின் அடிமட்டஆற்றல் நிலை எனப்படும். பெர்மியான்கள் பௌலியின் தவிர்க்கை விதிக்கு உட்படுவதால், அமைப்பின் அடிமட்டஆற்றல் சுழியாக இருப்பதில்லை. ஆற்றல்நிலைகள் அடிநிலையிலிருந்து அடுத்தடுத்துப் பெர்மியான்களால் நிரப்பப்பட, நிரப்பப்பட்ட உயர் ஆற்றல் நிலையின் ஆற்றல் பெர்மி ஆற்றல் எனலாம். பெர்மி ஆற்றல் நிலைக்குச் சற்றுக் கீழே உள்ள பெர்மியானுக்கு ஆற்றலூட்டி, நிரப்பப்படாதுள்ள உயர் ஆற்றல் நிலைக்கு, பெர்மி பரப்பைத் தாண்டி எடுத்துச் செல்லலாம். மிகத் தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் இது வழக்கமான கற்பிதக் கொள்கையிலிருந்து சற்று மாறுபடுகின்றது. எலக்ட்ரான்களுக்கிடையே புதிதாக முளைக்கும் கவர்ச்சி விசையாலான இடையீட்டுச் செயலால் அக் கிளர்ச்சிநிலை ஒரு புதிய அடிமட்டஆற்றல் நிலையாக அமைகின்றது.



(அ) சுழிவெப்பநிலையில் (ஆ) சுழிவெப்பநிலைக்கு அருகாமையில்

படம்.6.18 ஆற்றலுக்கும், ஆற்றல் நிலை நிறைவுறும் வாய்ப்பிற்குமான வரைபடம்

எலக்ட்ரான்கள் கவர்ச்சிப் பிணைப்பிலிருந்து விடுபட்டு விலகினால் மட்டுமே கிளர்ச்சிநிலை ஏற்படும். எனவே BCS அடிநிலையானது, கிளர்ச்சிநிலைகளின் தாழ்ந்த நிலையிலிருந்து குறிப்பிட்ட அளவுள்ள ஆற்றல் இடைவெளிக்குச் சமமான ஆற்றல் (Eg) விலகி இருக்குமாறு அமைந்திருக்க வேண்டும். மேலும் பெர்மி ஆற்றலுக்கு அருகாமையிலிருந்து ஏறக்குறைய $k_B\theta_D$ என்ற ஆற்றலுடன் இருக்கக்கூடிய எலக்ட்ரான்கள் மட்டுமே கவர்ச்சி விசையாலான வினையில் ஈடுபடுகின்றன என்பதால் ஆற்றல் இடைவெளியானது

பெர்மி நிலையின் பெர்மி பரப்போடு ஒட்டி அமைந்திருக்கின்றது எனலாம். இதன் ஒற்றைப் பரிமாணச் சமன் படம் 6.14-ல் காட்டப்பட்டுள்ளது.

BCS அடிநிலையின் இரு சிறப்பம்சங்கள் பின்வருமாறு.

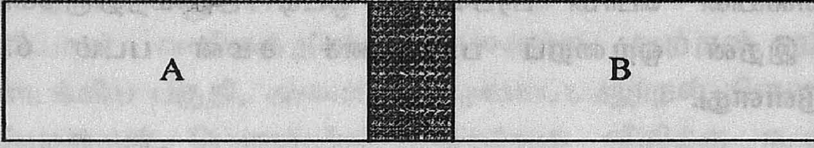
1) BCS அடிநிலையொன்றின் ஆற்றல் பெர்மி நிலை ஆற்றலை விடக் குறைவாக இருக்கின்றது. BCS நிலையின் ஆற்றல் என்பது இயக்க ஆற்றல் மற்றும் கவர்ச்சிப் பாங்குடன் கூடிய நிலையாற்றல் இவற்றை உள்ளடக்கியது. பெர்மி நிலையில் இது இயக்க ஆற்றலை மட்டுமே கொண்டுள்ளது. மேலும் கவர்ச்சி விசையால் விளையும் நிலையாற்றல் BCS நிலையின் ஆற்றலைக் குறைப்பதற்குக் காரணமாகின்றது. ஆற்றல் அடிப்படையில் இது பெர்மி நிலையை விட, BCS அடிநிலை மேலும் நிலைப்புத் தன்மை கொண்டது என்று தெரிவிக்கின்றது.

2) BCS அடிநிலைக்குக் காரணமாகும் புதிய ஆற்றல் நிலைகள் எப்போதும் ஜோடி எலக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்படுகின்றன. அதாவது k என்ற அலைவெக்டாருடன் கூடிய நிலை மேல் நோக்கிய தற்சுழற்சி (up spin) எலக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்பட்டிருக்குமானால் -k என்ற அலைவெக்டாருடன் கூடிய நிலை கீழ்நோக்கிய (down spin) தற்சுழற்சி எலக்ட்ரான்களால் நிரப்பப்பட்டிருக்கும். k நிலை வெற்று இடமெனில் -k நிலையும் வெற்று இடமாக இருக்கும். இவற்றின் கூடுதல் தற்சுழற்சி சுழி என்பதால் கூப்பர் இணை ஒரு போசான் போலச் செயல்படுகின்றது.

6.8 மீக்கடத்திகளில் ஊடுபாய்வு

(Super Conducting tunneling)

A,B என்ற வெவ்வேறு உலோகங்களாலான இரு சிறு துண்டுகளுக்கிடையே ஒரு மின்கடத்தாப் பொருள் (insulator) வைக்கப்பட்டு, இடைவெளியின்றி ஒரே துண்டாக ஆக்கப்பட்டுள்ளது.



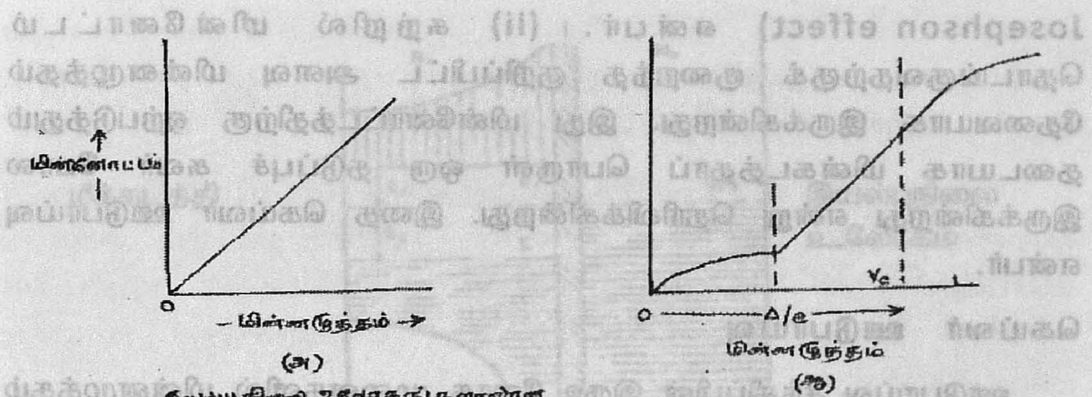
மின்கடத்தாப் பொருள்

படம்.6.19 மீக்கடத்திகளில் ஊடுபாய்வு – சோதனை அமைப்பின் பொதுத் தோற்றம்

இடையிலுள்ள மின்கடத்தாப் பொருள் A யிலிருந்து B-க்கு அல்லது Bயிலிருந்து Aக்கு கடத்து எலக்ட்ரான்கள் பாய்ந்து செல்வதற்கு ஒரு தடைச்சுவராக விளங்குகின்றது. இத்தடைச் சுவர் மெலியதாக், $10\text{-}20 \times 10^{-10}$மீ என்ற நெடுக்கையில் இருக்குமெனில், தடைச்சுவரில் மோதும் ஓர் எலக்ட்ரான் அதை ஊடுருவிக் கடந்து செல்வதற்குப் போதிய வாய்ப்பைப் பெறுகின்றது. இதுவே ஊடுபாய்தல் எனப்படுகின்றது. ஊடுபாய்தலுக்கான வாய்ப்பைக் குவாண்டம் இயக்கவியல் கொள்கைகள் மிகத் தெளிவாக வரையறுத்துக் கூறுகின்றன. அதனால் இவ்வமைப்பைக் குவாண்டம் ஊடுபாய்வுச் சந்திப்பு (quantum tunnel junction) என்று கூறுகின்றார்கள்.

பொதுவாக உலோகப் பரப்பில் மெல்லிதாகத் தோன்றியிருக்கும் ஆக்ஸைடு படலத்தையே மின்கடத்தாப் பொருள் ஊடகமாக அமைத்துக் கொள்கின்றார்கள். எடுத்துக்காட்டாக ஆவியாக்கிப் படியவைத்தல் மூலம் டின்னை ஒரு மென்படலமாக வடித்துவிட்டுச் சிறிது நேரம் காற்றில் உலர விட்டால் ஒரு மெல்லிய ஆக்ஸைடு படலம் அதன் மேற்பரப்பில் வளரும். போதிய தடிப்பிற்குப் பின்னர், மீண்டும் ஆவியாக்கிப் படியவைத்தல் மூலம் வேறொரு உலோகத்தை அதன்மேல் ஒரு மென் படலமாக வடிக்கலாம்.

இவ்வமைப்பின் மின்னோட்டம் - மின்னழுத்தத் தொடர்பு தாழ்ந்த மின்னழுத்தங்களில் மிகச் சரியாக ஓம் விதிக்கு உட்பட்டிருக்கின்றது. அதாவது சுற்றில் மின்னோட்டம், செயல்படும் மின்னழுத்தத்திற்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. ஆனால் இதில் ஒன்று அல்லது இரண்டு உலோகத் துண்டுகள் மீக்கடத்தும் நிலையிலிருப்பின் அதன் I-V வரைபடம் குறிப்பிடும் படியான மாறுபாடுடையதாக இருக்கின்றது. இதை முதன் முதலில் கெய்வர் (Giaever) என்பார் முன்னறிவித்தார்.



படம்.6.20. ஊடுபாய்வு சந்திப்பின் I-V வரைபடம்

இந்த மாறுபாட்டிற்குக் காரணம் மீக்கடத்திகளில் உள்ள எலக்ட்ரான்களின் ஆற்றல் நிலை பங்கீட்டுத்தனம், இயல்பு நிலையில் உள்ளதிலிருந்து வேறுபட்டிருப்பதுதான்.

மீக்கடத்திகளில் பெர்மி ஆற்றல் மட்டத்தை மையமாகக் கொண்டு ஓர் ஆற்றல் இடைவெளி இருக்கின்றது. என்றும் சார்பிலா சுழி வெப்பநிலையில், மீக்கடத்தியிலுள்ள எல்லா எலக்ட்ரான்களும் கூப்பர் இணைகளாக இருக்கும் என்றும் நாமறிவோம். இந்த இணையைப் பிரித்துத் தனியாக்குவதற்குப் போதிய ஆற்றலூட்டாத வரை அவ்வமைப்பில் மின்னோட்டத்தை எதிர்பார்க்க முடியாது. E_g என்பது ஆற்றலிடைவெளி என்றும், கூப்பர் இணையின் மின்னூட்டம் 2e என்றும் கொண்டால், கூப்பர் இணையைப் பிரிக்கத் தேவையான மின்னழுத்தம் $V = E_g / 2e = \Delta / e$ எனலாம்.

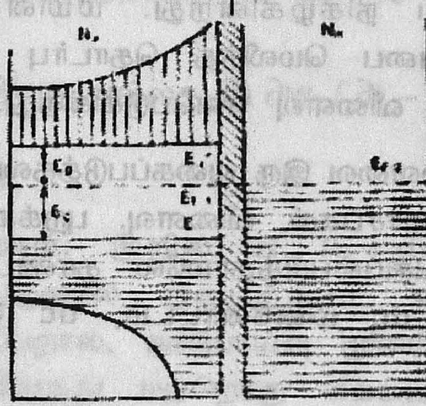
சார்பிலாச் சுழி வெப்பநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலைகளில் தாழ்ந்த மின்னழுத்தத்திலும் கூடச் சுற்றில் மின்னோட்டம் நிகழ்வதுண்டு. இதற்குக் காரணம் அவ்வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியில் உள்ள எலக்ட்ரான்கள் வெப்பக்கிளர்ச்சிக்கு ஆளாகின்றன என்பதுதான்.

ஊடுபாய்விற்கான I-V வரைபடத்தில் தனிச்சிறப்புடைய இருபகுதிகள் உள்ளன. (i) செயல்படும் மின்னழுத்தம் சுழியாக இருக்கும் போது கூடச் சுற்றில் நுண்ணிய அளவில் மின்னோட்டம் இருந்து கொண்டே இருக்கின்றது. இதை dc-ஜோப்ன் விளைவு (dc

Josephson effect) என்பர். (ii) சுற்றில் மின்னோட்டம் தொடங்குவதற்குக் குறைந்த குறிப்பிட்ட அளவு மின்னழுத்தம் தேவையாக இருக்கின்றது. இது மின்னோட்டத்திற்கு ஏற்படுத்தும் தடையாக மின்கடத்தாப் பொருள் ஒரு தடுப்புச் சுவர் போல இருக்கின்றது என்று தெரிவிக்கின்றது. இதை கெய்வர் ஊடுபாய்வு என்பர்.

கெய்வர் ஊடுபாய்வு

ஊடுபாய்வு சந்திப்பின் இருஉலோக முனைகளில் மின்னழுத்தம் செயல்படுமாறு செய்து, அதன் மதிப்புப் படிப்படியாக அதிகரிக்கப்படுகின்றது. அதனால் இயல்புநிலையில் இருக்கும் உலோக எலக்ட்ரான்களின் பெர்மி ஆற்றல் அதிகரிக்கின்றது. எனினும் செயல்படும் மின்னழுத்தம் V_e என்ற ஒரு குறிப்பிட்ட மாறுநிலை மின்னழுத்தத்தை எட்டும் வரை சுற்றில் மின்னோட்டம் ஏதுமிருப்பதில்லை. அதன் பிறகு மின்னோட்டம் படம் 12.20 (ஆ)ல் காட்டியபடி அதிகரிக்கின்றது. இதை குவாண்டம் இயக்கவியல் அடிப்படையில் விளக்க முடியும். தடைச்சுவருக்கு ஒரு பக்கமுள்ள எலக்ட்ரான், அது பெற்றிருக்கின்ற ஆற்றலுக்கு ஏற்ப அனுமதிக்கப்பட்ட ஆற்றல்நிலை மறுபக்கத்தில் இருந்தால், ஊடுபரவலுக்கு சுழியில்லாத ஒரு வாய்ப்பைப் பெறுகின்றது. படம்.6.21 சார்பிலா சுழி வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தி – ஆக்ஸைடு - இயல்பு நிலை உலோகம் என்ற ஊடுபாய்வு சந்திப்பில் ஆற்றலுக்கு ஏற்ப இருக்கும் ஆற்றல் நிலைகளின் செறிவையும், பெர்மி நிலையையும் காட்டுகின்றது. இயல்புநிலை உலோகத்தில் பெர்மி நிலை வரையிலான அனைத்து ஆற்றல் நிலைகளும் நிரப்பப்பட்டுள்ளன. மீக்கடத்தியில் பெர்மி நிலை ஆற்றலிடைவெளிக்கு மையமாக இருக்கின்றது. இதற்கு இருமருங்கும், நிரப்பப்பட்ட ஆற்றல் நிலைகளும், நிரப்பப்படாது இருக்கக் கூடிய ஆற்றல் நிலைகளும் உள்ளன.



படம்.6.21 சார்பிலா சுழி வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தி-ஆக்ஸைடு-இயல்பு நிலை உலோகம் வழியிலான ஊடுபாய்வு

சந்திப்பிற்குக் குறுக்காக ஒரு மின்னழுத்தத்தைச் செயல்படுத்த இயல்புநிலை உலோகத்தின் பெர்மி நிலை E_{F2} அதிகரிக்கின்றது. இந்த E_{F2}, மீக்கடத்தியிலுள்ள E_F' ஐ விட அதிகமாக இல்லாத வரை மீக்கடத்தியிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் தடைச்சுவரைத் தாண்டி ஊடுபரவி மறுபக்கத்திற்கு வரமுடியாது. எனவே சுற்றில் மின்னழுத்தம் இந்த ஆற்றல் பட்டை இடைவெளிக்குக்குச் சமமாக $(E_1' - E_{F2})$ இருக்கும் நிலையை எட்டும் வரை சுற்றில் மின்னோட்டம் விளைவதில்லை. இதுவே கெய்வர் ஊடுபாய்வாகும். மீக்கடத்தி மின்கடத்தாப்பொருள் - இயல்புநிலை உலோகம் என்பதிற்குப் பதிலாக மீக்கடத்தி – மின்கடத்தாப் பொருள் - மீக்கடத்தியாலான ஊடுபாய்வு சந்திப்பையும் பயன்படுத்தலாம்.

ஜோசப்சன் விளைவு

கெய்வர் ஊடுபாய்வில், இடைஊடகமான மின்கடத்தாப் பொருள் ஊடாக மின்னோட்டம் என்பது தனி எலக்ட்ரான்களின் கடத்தலாக இருக்கின்றது. இடைஊடகத்தின் தடிப்பு போதிய அளவில் மேலும் மெல்லியதாக இருப்பின், ஒரு மீக்கடத்தியிலிருந்து மற்றொரு மீக்கடத்திக்கு மின்னோட்டம் என்பது கூப்பர் இணைகளின் கடத்தலாகவே இருக்கமுடியும். இதையே மீமின்னோட்டம் என்று கூறுகின்றார்கள். ஏனெனில் இது எந்த மின்னழுத்தமும்

செயல்படாமலேயே நிகழ்கின்றது. மீமின்னோட்டம் நிகழும் வாய்ப்புள்ள சந்திப்பை மெலிந்த தொடர்பு (weak link) என்பர். இதுவே ஜோசப்சன் விளைவு எனப்படுகின்றது.

ஜோசப்சன் விளைவை இரு வகைப்படுத்தலாம். (i) dc ஜோசப்சன் விளைவு (ii) ac ஜோசப்சன் விளைவு. புறக்காந்தப்புலம் அல்லது மின்புலம் ஏதும் செயல்படுத்தாமலே தூண்டப்பட்டுச் சந்திப்பின் மூலமாக நிகழும் dc மின்னோட்டம், dc ஜோசப்சன் விளைவு எனப்படுகின்றது.

சந்திப்பின் குறுக்காக ஒரு dc மின்னழுத்தத்தைச் செயல்படுத்தும்போது, உயர் அதிர்வெண்ணுடன் கூடிய ஒரு மாறுதிசை மின்னோட்டத்தைச் சந்திப்பின் குறுக்காகத் தோற்றுவிக்கின்றது. மேலும் ஒரு dc மின்னழுத்தத்தோடு ரேடியோ அதிர்வெண் நெடுக்கையில், ஒரு ac மின்னழுத்தத்தையும் இணைந்து செயல்படுத்த, சுற்றில் ஒரு dc மின்னோட்டம் ஏற்படுகின்றது. இதை ac ஜோசப்சன் விளைவு என்பர்.

dc ஜோசப்சன் விளைவு

ஒரு மெல்லிய மின்கடத்தாப் பொருளால் பிரிக்கப்பட்டுள்ள ஒத்த தன்மையுடைய இரு மீக்கடத்திகளாலான ஜோசப்சன் சந்திப்பைக் கருதுவோம். தாழ்ந்த வெப்பநிலையில் இருப்பதாகவும், அதனால் கடத்தியிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் எல்லாம் கூப்பர் இணைகளாக இருப்பதாகவும் எடுத்துக் கொள்வோம்.

ψ_1 என்பது சந்திப்பின் ஒரு பக்கத்திலுள்ள கூப்பர் இணைகளின் அலைசார்பு அல்லது ஊடகத்தில் ஓரிடத்தில் இருப்பதைக் குறிக்கும் வாய்ப்பின் அலைவீச்சு என்றும், Ψ_2 என்பது மறுபக்கத்தில் அதற்கிணையான இயற்பியல் கூறு என்றும் கொள்வோம். தற்சமயத்திற்கு அவையிரண்டும் சுழி நிலைமின் அழுத்தத்தில் இருப்பதாகவும் நாம் கருதுவோம்.

மின்கடத்தாப் பொருளின் தடிப்பு அதிகமாக இருந்தால் மீக்கடத்திகளில் உள்ள கூப்பர் இணைகள் ஒவ்வொரு மீக்கடத்தியிலும் தனித்தியங்கும். இந்நிலையில் நேரம் சார்ந்த ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டை

$$ik\, \partial\psi_1 / \partial t = H_1\psi_1 \text{ அல்லது } ih\, \partial\psi_1/\partial t - H_1\psi_1 = o$$

(6.29)

$$ik\, \partial\psi_2 / \partial t = H_2\psi_2 \text{ அல்லது } ih\, \partial\psi_2 / \partial t - H_2\psi_2 = o$$

இதில் $h = h/2\pi$

என்று எழுதலாம். இதில் H_1, H_2 என்பன ஹாமில்டன் செயலிகளாகும். ஆனால் இடைத்தடை ஊடகத்தின் தடிப்பு மெல்லியதாக இருப்பதால், ஊடுபாய்வு மூலம் கூப்பர் இணைகள் ஒரு மீக்கடத்தியிலிருந்து மற்றொரு மீக்கடத்திக்குச் செல்வது தடுக்கப்படுவதில்லை. இந்நிலையை ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டில் முறையான திருத்தத்தால் உட்புகுத்திக் கொள்ளலாம்.

$$\left.\begin{aligned} ih\, \partial\psi_1 / \partial t\, H_1\psi_1 &= C\psi_2 \\ ih\, \partial\psi_2 / \partial t - H_2\psi 2 &= C\psi_1 \end{aligned}\right\} \quad (6.30)$$

இதில் C என்பது மின்கடத்தாப் பொருளின் தன்மை, மற்றும் அதன் தடிப்பு இவற்றைப் பொருத்த ஒரு மாறிலியாகும். தடிப்பு அதிகமானால் C-ன் மதிப்பு சுழியாகும்.

செயல்படும் மின்னழுத்தம் சுழியெனில்

$$H_1 = H_2$$

இந்நிலையில்

$$ih\, \partial\psi_1/\partial t = C\psi_2 - H\psi_1 = hT\psi_2 \quad (6.31\ a)$$

hT என்பது கூப்பர் இணையின் பாதிப்பாகும். இதுபோல மறுபக்கத்துத் தொடர்பையும் மாற்றிக் கொள்ளலாம்.

$$ih\, \partial\psi_2 / \partial t = C\psi_1 - H\psi_2 = hT\, \psi_1 \quad (6.31.\ b)$$

அலைசார்புகளை

$\psi_1 = n_1^{1/2} e^{i\theta 1}$; $\psi_2 = n_2^{1/2} e^{i\theta 2}$ என்று கொள்வோம். θ_1, θ_2 என்பன மீக்கடத்திகளில் அலைச்சார்பின் நிலைக்கட்டங்களாகும்.

எனவே

$$\partial\psi_1 / \partial t = ½\, n_1^{-1/2} e^{i\theta 1}\, \partial n_1 / \partial t + i\psi_1\, \partial\theta_1 / \partial t = -iT\psi_2$$

$\partial\psi_2 / \partial t = ½ n_2^{-1/2} e^{i\theta 2} \partial n_2 / \partial t + i\psi_2 \partial\theta_2/\partial t = iT\psi_1$

$\partial\psi_1 / \partial t$ ஐ $n_1^{1/2} e^{-i\theta 1}$ ஆல் பெருக்க

$½ \partial n_1 /\partial t + in_1 \partial\theta_1 / \partial t = iT (n_1 n_2)^{1/2} e^{i\delta}$

இதில் $\delta = \theta_2 - \theta_1$ ஆகும். இரு பக்கங்களில் உள்ள மெய்ம மற்றும் பொய்ம மதிப்புகள் சமம் என்பதால்

$$\partial n_1 / \partial t = 2T (n_1 n_2)^{1/2} \text{ Sin } \delta \quad (6.32)$$

$$\partial\theta_1 / \partial t = -T (n_2 / n_1)^{1/2} \text{ Cos } \delta$$

இதைப்போல $\partial\psi_2 / \partial t$ -யை $n_2^{1/2} e^{-i\theta 2}$ ஆல் பெருக்கிப்பின் மெய்ம மற்றும் பொய்ம மதிப்புகளைச் சமப்படுத்த

$$\partial n_2 / \partial t = -2T (n_1 n_2)^{1/2} \text{ Sin } \delta \quad (6.33)$$

$$\partial\theta_2 / \partial t = -T (n_1 / n_2)^{1/2} \text{ Cos } \delta$$

மின்கடத்தாப் பொருள் இடை ஊடகத்தடைக்கு இருமருங்குமுள்ள மீக்கடத்திகள் ஒத்தவை எனில் $n_1 = n_2$ எனலாம். எனவே

$$\partial\theta_1 / \partial t = \partial\theta_2 / \partial t$$

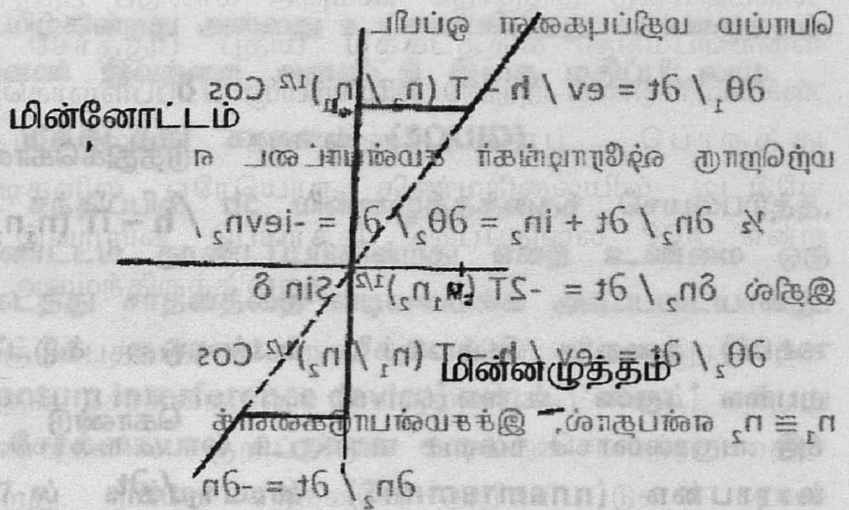
அல்லது $\partial/\partial t (\theta_2 - \theta_1) = 0$

$$\partial n_2 / \partial t = -\partial n_1 / \partial t$$

மீக்கடத்தி 1 லிருந்து மீக்கடத்தி 2 க்குச் செல்லும் மின்னோட்டம் $\partial n_2 / \partial t$ அல்லது $-\partial n_1 / \partial t$ க்கு, நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. எனவே சந்திப்பைக் கடந்து செல்லும் மீமின்னோட்டம் நிலைகட்ட வேறுபாடு δ-ன் மதிப்பைப் பொருத்து அமைகின்றது என நாம் முடிவு செய்யலாம். இது

$$J = J_o \text{ Sin } [\delta (o) - (2ev/h)]t \quad (6.34)$$

என்ற தொடர்பைத் தருகின்றது. J_o என்பது J-ன் பெரும மதிப்பு $J_o = 2T(n_1 n_2)^{1/2}$, எனவே இது Tஐச் சார்ந்த ஓர் உறுப்பு எனலாம். இதிலிருந்து சந்திப்பின் வழிச் செல்லும் dc மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு, நிலைக்கட்ட வேறுபாட்டைப் பொருத்து $-J_o$ லிருந்து $+J_o$ வரைக்குள் உட்பட்ட ஒரு மதிப்பாக இருக்கும். இதுவே dc ஜோசப்சன் விளைவு எனப்படுகின்றது.



படம். 6.22 dc ஜோசப்சன் விளைவு

ac. ஜோசப்சன் விளைவு

இப்பொழுது ஜோசப்சன் சந்திப்பிற்குக் குறுக்காக v என்ற ஒரு மின்னழுத்தத்தைச் செயல்படுத்துவோம். இரு மீக்கடத்திகளுக்கு இடையே ஒரு மின்கடத்தாப் பொருள் இருப்பதால் இதை நாம் மேற்கொள்ள முடியும். -2e என்ற மின்னூட்டங்கொண்ட ஒரு கூப்பர் இணை இம்மின்னழுத்தத்தினால் சந்திப்பைக் கடக்கும் போது -2eV என்ற நிலையாற்றல் வேறுபாட்டைப் பெறுகின்றது. அதாவது ஒரு பக்கத்திலுள்ள கூப்பர் இணையின் நிலையாற்றல் -ev என்றும் மறுபக்கத்திலுள்ள அதன் நிலையாற்றல் +ev என்றும் கொள்வது இதற்கு ஒப்பானதே. எனவே கூப்பர் இணையின் ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டைக் கீழ்வருமாறு குறிப்பிடலாம்.

$$\left.\begin{aligned} ik\,\partial\psi_1/\partial t &= hT\psi_2 - ev\psi_1 \\ ik\,\partial\psi_2/\partial t &= hT\psi_1 + ev\psi_2 \end{aligned}\right\} \quad (6.35)$$

dc ஜோப்சன் விளைவில் பின்பற்றிய அதே வழிமுறையின் படி

$$½\ \partial n_1/\partial t = in_1\,\partial\theta_1/\partial t = ievn_1/h - iT(n_1 n_2)^{1/2} e^{i\delta}$$

இரு மருங்குமுள்ள மெய்ம மதிப்புக்களை ஒப்பிட

$$\partial n_1/\partial t = 2T\,(n_1\,n_2)^{½}\ \text{Sin}\ \delta \qquad (6.36)$$

பொய்ம மதிப்புகளை ஒப்பிட

$$\partial\theta_1 / \partial t = ev / h - T (n_2 / n_1)^{1/2} \text{ Cos } \delta \qquad (6.37)$$

மற்றொரு ஷ்ரோடிங்கர் சமன்பாட்டை எடுத்துக்கொண்டால்

$$½ \ \partial n_2 / \partial t + in_2 = \partial\theta_2 / \partial t = -ievn_2 / h - iT (n_1 n_2)^{1/2} e^{-i\delta}$$

இதில் $\delta n_2 / \partial t = -2T (n_1 n_2)^{1/2} \text{ Sin } \delta$ (6.38)

$$\partial\theta_2 / \partial t = -ev / h - T (n_1 / n_2)^{1/2} \text{ Cos } \delta \qquad (6.39)$$

$n_1 \cong n_2$ என்பதால், இச்சமன்பாடுகளைக் கொண்டு

$$\partial n_2 / \partial t = -\partial n_1 / \partial t$$

$$\partial (\theta_2 - \theta_1) / \partial t = \partial\delta / \partial t = -2ev / h$$

நிலைக்கட்ட வேறுபாட்டில் t = o முதல் t = t வரையில் ஏற்படும் மாற்றம்

$$\int_{t=o}^{t=t} \partial\delta = \delta(t) - \delta(o) = (-2ev / h) \ t$$

அல்லது $\delta(t) = \delta(o) - (2ev / h) \ t$

எனவே மீமின்னோட்டம்

$$J = J_o \text{ Sin } [\delta(o) - (2ev / h)] \ t \qquad (6.40)$$

இத்தொடர்பு ஜோசப்சன் சந்திப்பு வழியாகச் செல்லும் மின்னோட்டம் மாறுதிசை மின்னோட்டமாக இருக்கின்றது என்றும் அதன் அதிர்வெண்

$$\omega = 2ev / h \qquad (6.41)$$

ஆக உள்ளது. இது ac ஜோசப்சன் விளைவு எனப்படுகின்றது. ஒரு மைக்ரோ வோல்ட் மதிப்புள்ள dc மின்னழுத்தம் 483.6 ஹெர்ட்ஸ் அதிர்வெண்ணுடன் கூடிய மாறுதிசை மின்னோட்டத்தை விளைவிக்கின்றது.

$h\omega = 2ev$ என்ற தொடர்பு ஒரு கூப்பர் இணை சந்திப்பின் இடைத்தடையைக் கடந்து செல்லும்போது $h\omega$ என்ற ஆற்றலுடைய

போட்டானை உமிழ்கின்றது அல்லது உட்கவர்கின்றது. மின்னழுத்தம், மற்றும் அதிர்வெண் இவற்றை அளவிட்டு இதை மதிப்பிடலாம்.

6.9 ஸ்குட் - மீக்கடத்தி சாதனம் (SQUID)

ஜோசப்சன் சந்திப்பில் dc மின்னழுத்தத்தைச் செயல்படுத்த, ஒரு ac மின்னோட்டம் தூண்டப்படுகின்றது என்ற உண்மை ஒரு நுட்பமான மீக்கடத்து சாதனத்தை வடிவமைக்க அடிப்படையானது. இதை குறுக்கீட்டுக் குவாண்டம் மீக்கடத்தி சாதனம் (Super Conducting quantum interference device) என்பர். 'ஸ்குட்' என்பது முதலெழுத்துச் சேர்க்கையால் உருவான கலைச் சொல்லாகும். இச் சாதனம் 1967-ல் சிம்மர்மான் (Zimmermann) என்பாரால் கண்டுபிடிக்கப்பட்டது.

இதில் இரு ஜோசப்சன் சந்திப்புகள் மீக்கடத்தும் வளைய வடிவில் பொருத்தப்பட்டுள்ளன. இச்சந்திப்பிற்குக் குறுக்காக ஒரு புற மின்னழுத்தத்தைத் செயல்படுத்தலாம்.

1. செயல்படும் மின்னழுத்தம் சுழியாக இருக்கும் போது கூடச் சுற்றில் நுண்ணிய அளவு மின்னோட்டம் இருந்து கொண்டேயிருக்கின்றது. இது ஒருதிசை மின்னோட்ட ஜோசப்சன் விளைவாகும்.
2. ஒரு திசை மின்னழுத்தம் செயல்படுத்த உயர் அதிர்வெண்ணுடன் கூடிய ஒரு மாறுதிசை மின்னோட்டம் சுற்றில் ஏற்படுகின்றது.
3. ஒருதிசை மின்னழுத்தத்தோடு, ரேடியோ அதிர்வெண் நெடுக்கையில் ஒரு மாறுதிசை மின்னோட்டத்தையும் இணைந்து செயல்படுத்தச் சுற்றில் ஒருதிசை மின்னோட்டம் நிகழ்கின்றது. இந்த உண்மையே ஸ்குட் என்ற சாதனத்தில் பயன்படுத்தப்படுகின்றது.

உலோகம் 1

Junctions

மின்கடத்தாப்பொருள்

உலோகம்-2

படம்.6.23 ஸ்குட் (SQUID)

ஒரு புறக்காந்தப்புலம் வளையத்திற்கு நேர்குத்தாகச் செயல்படுமாறு செய்து அப்புலத்தின் செறிவைக் கணக்கிட்டறியலாம். காந்தப்புலம் செயல்படும்போது மீக்கடத்தும் வளையத்தைக் கடந்து செல்லும் மொத்தக் காந்தப்பாயம் எல்லா மதிப்புடையதாகவும் இருப்பதில்லை. பாயன் (fluxoid) என்ற நுண்ணளவின் மடங்காக உள்ளது. குவாண்டம் மதிப்புகளைக் கொண்ட பாயனின் மதிப்பு hC/ e-ன் மடங்குகளாக உள்ளது.

$$\pi(hC / e) = 2.0678 \times 10^{-7} \text{ டெஸ்லா-மீ}^2 \qquad (6.42)$$

காந்தப்பாயத்தின் இவ்வலகு பாயன் எனப்படுகின்றது. எனவே வளையத்தைக் கடந்து செல்லும் காநதப் பாயத்தின் மதிப்பு

$$\phi = \pi (hC / e)s \qquad (6.43)$$

இதில் s என்பது ஒரு முழு எண்ணாகும்.

ஓர் அடைப்புச் சுற்றுக்கு நிலைகட்ட வேறுபாடு δ

$$\delta = \theta_2 - \theta_1 = (2e / hC)\phi$$

இத்தொடர்பை மீக்கடத்தியாலான பாதி வளையத்திற்கு உட்படுத்த

$$\delta_a = \delta_o + e / hC\,\phi$$

மறுபாதி வளையத்தில்

$$\delta_b = \delta_o - e / hC\,\phi$$

இரு ஜோசப்சன் சந்திப்பு வழியாகச் செல்லும் மின்னோட்டச் செறிவு முறையே

$$J_a = J_o \, Sin \, \delta_a$$

$$J_b = J_o \, Sin \, \delta_b$$

எனவே மீக்கடத்திகளாலான சாதனத்தில் நிகழும் மொத்த மின்னோட்டம்

$$J = J_a + J_b$$

$$= J_o \{Sin [\delta_o + (e / hC) \phi] + Sin [\delta_o -(e /hC) \phi]\}$$

$$= 2J_o \, Sin \, \delta_o \, Cos \, e\phi / hC$$

எனவே மின்னோட்டச் செறிவு ϕ-ன் மதிப்பிற்கு ஏற்ப மாறுபடுகின்றது. இம்மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு

$$e\phi / hC = s\pi$$

என்ற நிலையில் பெருமமாக இருக்கின்றது.

ஸ்குட் ஒருவகையில் உணர்வு நுட்பமிக்கதொரு காந்தமானியாகும். இதைக் கொண்டு 10^{-9} காஸ் காந்தப்புலத்தைக் கூடத் துல்லியமாக அளவிட்டறிந்து கொள்ளமுடியும்.

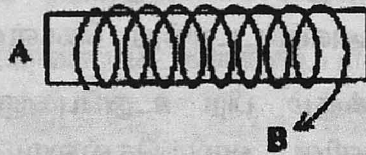
உடலில் மூளைக்கும் பிற உறுப்புகளுக்குமிடையே செய்திப் பரிமாற்றம் நரம்புகளின் வழிச்செல்லும் மின்பொதிமங்களால் ஏற்படுகின்றது. இதனால் ஒருவகையான நுண்ணிய மின்னோட்டம் உடலுக்குள்ளே தொடர்ந்து நிகழ்ந்து கொண்டேயிருக்கின்றது. இது உடலுறுப்பைச் சுற்றி ஒருநுண்ணிய காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றது. மீக்கடத்திச் சாதனத்தைக் கொண்டு மட்டுமே மிகத் துல்லியமாக இதுபோன்ற நுண்ணிய காந்தப்புலத்தை மதிப்பிட்டறிந்து உடலுறுப்புகள் பழுதின்றி இயங்கிக் கொண்டிருக்கின்றதா என்பதை அறியமுடிகின்றது. கருப்பையில் வளரும் ஒரு சிசுவின் காந்தப்புலத்தை மதிப்பிட்டு அதன் வளர்ச்சியை அறியலாம். இதை உயிரியல் காந்தம் (Bio magnetism) என்று குறிப்பிடுகின்றார்கள்.

மீக்கடத்திகள் இன்றைக்குக் கணினித் துறையிலும் பயன்படுத்தப்படுகின்றன. விரிவான செயலாக்கப்பணிகளினால்

கணினியில் மின்னோட்டத்தின் செறிவு அதிகரித்துக் கொண்டு வருகின்றது. இதற்குக் காரணம் இணைப்பு மின்கம்பிகளின் குறுக்குப் பரப்பு மிகவும் குறைவாக இருக்கின்றது என்பது தான். அதனால் கணினியின் பயன் விரிவு என்பது மீக்கடத்திகளை ஈடுபடுத்திக் கொள்வதில் இருக்கின்றது எனலாம். கணினியின் நினைவகங்களிலும், பதிவகங்களிலும் மீக்கடத்திகள் பயன் தருகின்றன. ஜோசப்சன் சந்திப்பு அதன் மின்னோட்டம் - மின்னழுத்தப் பண்புகள் காரணமாகக் கணினியில் நினைவுக் கூறாகச் செயல்படுத்தத் தகுதியானதாக இருக்கின்றது.

6.10 கிரையோட்ரான் (Cryotron)

இதுவும் மீக்கடத்தியின் பயன்பாட்டால் உருவான ஒரு சாதனமாகும். செயல்படும் காந்தப்புலம், ஒரு மீக்கடத்தியின் மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்தை விடக் கூடுதலாகுமானால் மீக்கடத்தும் தன்மை அழிந்துவிடுகின்றது என்ற உண்மையின் அடிப்படையில் கிரையோட்ரான் என்ற ஒரு மின்னஞ்சல் (relay) அமைப்பை உருவாக்கியுள்ளார்கள். இது மின்சுற்றின் வாயில்களாகச் (Gating circuits) செயல் படக்கூடியது.



படம். 6.24 கிரையோட்ரான்

இதில் A என்ற மீக்கடத்தும் கம்பியைச் சுற்றி B என்ற மீக்கடத்தியாலான கம்பி மின்சுருள் வடிவில் அமைக்கப்பட்டுள்ளது. A-ன் மாறுநிலைக் காந்தப்புலம், B-ன் மாறு நிலைக் காந்தப் புலத்தைவிடக் குறைவாக இருக்குமாறு தகுந்த மீக்கடத்தும் பொருட்கள் தேர்ந்தெடுக்கப்பட்டுள்ளன. சுற்றுப்புறத்தின் வெப்பநிலை இவ்விரு மீக்கடத்திகளின் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைகளுக்கும் குறைவாக இருக்குமாறு செய்யப்பட்டுள்ளது. இப்போது A-ன் வழியாகப் பாயும் மின்னோட்டத்தின் மதிப்பை B-ன் வழிச் செல்லும் மின்னோட்டத்தைக் கொண்டு கட்டுப்படுத்த முடியும். ஏனெனில் B-ன் வழிச் செல்லும் மின்னோட்டத்தால் ஏற்படும் காந்தப்புலத்தால் A-ன் மீக்கடத்தும் தன்மை பாதிக்கப்பட்டு மின்னோட்டம் மட்டுப்படுத்தப்படுகின்றது.

6.11. உயர்வெப்பநிலை மீக்கடத்திகள் (High temperature superconductors)

மீக்கடத்திகளைப் பயன்படுத்துவதில் உள்ள நடைமுறைச் சிக்கல் அவற்றின் பயன்பாட்டை எளிதாக எட்ட முடியாததாக்கி விடுகின்றது. 20K வெப்பநிலையை நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையாகக் கொண்டுள்ள பொருளை குளிர்வூட்டி மீக்கடத்தியாக்க நீர்ம ஹீலியம் தேவையாக இருக்கின்றது. நீர்ம ஹீலியம் 4.21K வெப்பநிலையில் கொதிப்பதால் இது இயலுவதாகின்றது. எனினும் இதைப் பெறும் வழிமுறையில் இவ்வெப்பநிலையைப் படிப்படியாகப் பெற வேண்டியிருப்பதாலும், அதைத் தக்க வைத்துக்கொள்ளச் சரியான வெப்பக் காப்பீட்டு முறைகளைச் செய்ய வேண்டியிருப்பதாலும் இது மிகவும் செலவு மிக்க வழிமுறையாக இருக்கின்றது. இதனால் ஒரு சிறிய மீக்கடத்தி கூட மிகப்பெரிய கட்டமைப்பைக் கொண்டிருக்கின்றது. ஆனால் 100K வெப்பநிலையைப் பெற்றுள்ள மீக்கடத்தியைப் பெற அதை நீர்ம நைட்ரஜனால் குளிர்வூட்டினால் போதுமானது. நீர்ம நைட்ரஜனின் கொதிநிலை 77K ஆகும். எனவே நீர்ம ஹீலியத்தால் செயல்படும் மீக்கடத்திகளைக் காட்டிலும் இது 500 மடங்கு உற்பத்திச் செலவால் அனுகூலமானது.

மேலும் உயர் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை கொண்டுள்ள மீக்கடத்திகள் அவ்வெப்பநிலைக்குக்கீழ் நீண்ட வெப்பநிலை நெடுக்கையில் பயன்தரத்தக்கன. அதனால் அதன் பயன்பாட்டை எளிதாக விரிவுபடுத்திக் கொள்ளமுடிகின்றது.

கொள்கை

திண்மப் பொருளில் உள்ள, ஒன்றுக்கொன்று எதிரான தற்சுழற்சியுடைய இரு கடத்துஎலக்ட்ரான்களின் இணைவால் மீக்கடத்தும் நிலை தூண்டப்படுகின்றது என்றும், இவ்விணைவு படிகத்தளத்தின் அதிர்வின் விளைவு என்றும் நாம் முன்பு அறிந்துகொண்டோம். அதாவது படிகத்தளமொன்று அதிர்விற்கு உள்ளாகும்போது, ஒரு குறிப்பிட்ட அளவுடைய ஆற்றலை, இரு எலக்ட்ரான்கள் ஒன்றுக்கொன்று பரிமாறிக் கொள்கின்றன. இவ்வாற்றலை நாம் போனான் எனக் குறிப்பிட்டோம். பார்டீன் - கூப்பர் - ஷெரிப்பர் இவர்களுடைய கொள்கைப்படி அறை வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் நிலை ஏற்படுவதற்குரிய சாத்தியக்

கூறுகள் அறவேயில்லை. எனினும் கிளர்ச்சியூட்டப்பட்ட கடத்து எலக்ட்ரான்கள், அதாவது அடிமட்ட ஆற்றல் நிலையை விட, உயர் ஆற்றல் நிலையிலுள்ள கடத்து எலக்ட்ரான்கள் ஒரு குறிப்பிட்ட அளவு ஆற்றலை ஒன்றுக்கொன்று பரிமாறிக் கொள்ளும் வாய்ப்புடையனவாக இருக்கலாம். இவ்வாற்றலும் குவாண்டம் மதிப்புடையனவாக இருக்கின்றது. இதன் அடிப்படை அளவை எக்சைட்டான் (Exciton) என்று கூறுகின்றார்கள். எக்சைட்டான் இணைவு, போனான் இணைவை விட இறுக்கமானது. இது செயல்முறையில் சாத்தியமானால், அறை வெப்ப நிலையில் மீக்கடத்தும் நிலையும் சாத்தியமாகும்.

இயற்பியல் கொள்கை மூலம் பெற்ற முடிவுகளின்படி உலோக ஹைட்ரஜன் (Metallic hydrogen) 100-300K வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தியாக இருக்கலாம் என்பது தெரியவந்துள்ளது. இயல்பான சூழ்நிலையில் ஹைட்ரஜன் வளிம நிலையில் இருக்கின்றது. 13.95K வெப்பநிலையில் உறைந்து திண்மமாகிவிடுகின்றது. 20.35K வெப்பநிலையில் கொதித்து ஆவியாகி விடுகின்றது. திண்ம ஹைட்ரஜன் ஒரு மின் கடத்தாப் பொருளாகும். இதன் அடர்த்தி 76கிலோ/கனமீட்டர். ஹைட்ரஜன் அணுக்கள் உயர் அழுத்தத்திற்கு உட்படும் பொழுது புறச்சுற்றிலுள்ள எலக்ட்ரான்கள் நீக்கம் செய்யப்பட்டு உலோக நிலையை அடைகின்றது. அதாவது ஓர் உலோகம் போலச் சில குறிப்பிட்ட பொதுப் பண்புகளைப் பெறுகின்றது. இந்நிலையில் இரு ஹைட்ரஜன் அணுக்களுக்கிடைப்பட்ட தொலைவு ஏறக்குறைய புரோட்டானின் விட்டத்திற்குச் சமமாகும். உலோகநிலை ஹைட்ரஜனின் அடர்த்தி 10^4 கிலோ/கனமீட்டர் ஆகும்.

வியாழன், சனி போன்ற பெரிய வடிவ சூரியக்கோள்களில் ஹைட்ரஜன் உறைந்து, வளிமண்டல அழுத்தத்தால் இறுக்கப்பட்டிருப்பதால், அங்கு ஹைட்ரஜன் உலோக நிலையில் இருக்கலாம் என ஆராய்ச்சியாளர்கள் கூறுகின்றார்கள. ஆனால் பூமியில் இது ஆய்வுக்கூடங்களில் கூட உருவாக்கப்படவில்லை.

இந்தியாவைச் சேர்ந்த எக்போட் (S.N. Ehbote), குப்தா (S.K.Gupta) மற்றும் நர்லிகர் (A.V.Narlikar) போன்ற விஞ்ஞானிகள் மீக்கடத்தும் நிலை பற்றிய புதிய கருத்துகளைத் தெரிவித்துள்ளனர். இவர்களுடைய கருத்துப்படி, எலக்ட்ரான்களின் இணைவு

போனான்களினால் ஏற்படுவதில்லை என்றும், அது தற்சுழற்சியுடைய எலக்ட்ரான்களின் காந்த விசையால் ஏற்படும் இடையீட்டுச் செயலால் விளைகின்றது என்றும் கூறலாம். இவர்களுடைய கொள்கை உயர்வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் நிலை என்பது சாத்தியம் எனத் தெரிவிக்கின்றது.

சோதனை

பிரௌன் மற்றும் ஹோமன் (E. Brown and C.G. Homan) போன்ற விஞ்ஞானிகள் படிக உருவமற்ற குறைக்கடத்தியாலான காட்மியம் சல்பைடு (வழக்கமான சிலிகான் மற்றும் ஜெர்மானியம் குறைக்கடத்திகள் படிகமானவை) என்ற கனிமச் சேர்மத்தின் மீது செயல்படும் உயரழுத்தத்தை திடீரென்று நீக்கியவுடன், ஒரு குறிப்பிட்ட நிலையில் 77K வெப்பநிலையிலும் அது மீக்கடத்தும் திறனுடையதாக இருப்பதைக் கண்டறிந்தார்கள். இது உயர் வெப்பநிலையில் மீக்கடத்துதல் என்பது இயலக்கூடியதே என்பதைச் சுட்டிக்காட்டுவதாக இருக்கின்றது.

உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகள் பற்றிய ஆய்வுக்கு முதலில் கரிம வேதிப் பொருட்களையும், இயல்புநிலையில் மின்கடத்தாப் பொருளாக இருக்கும் பொருட்களையும் எடுத்துக் கொண்டார்கள். சில கரிம மின்கடத்திகள் மீக்கடத்தியாக நிலைமாற்றம் பெறுகின்றன என்பதை அப்போது கண்டறிந்தார்கள். புரோமின் ஊட்டப்பட்ட, பல்மமயமான (Polymer) கந்தகம் மற்றும் நைட்ரஜனாலான சங்கிலித் தொடர் போன்ற மூலக்கூறு $[SNBr_{0.4}]_x$ களாலான மீக்கடத்தியின் நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 0.36K. எனினும் 10K வரை பெயர்ச்சி வெப்பநிலை கொண்ட கரிம மீக்கடத்திகளைக் கண்டறிந்துள்ளனர். கரிம மீக்கடத்திகளின் சிறப்பு மூலக்கூறு கட்டமைப்பு, அவைகளுக்கு உயர் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைத் தரலாம் என எதிர்பார்க்கின்றார்கள்.

தனி உலோகங்களைக் காட்டிலும் பல கலப்பு உலோகங்கள் கூடுதலாக நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக் கொண்டுள்ளன எடுத்துக்காட்டாக நையோபியம் - ஜெர்மானியம் கலப்பு உலோகம் தனி உலோகங்களின் நிலைமாற்றுப் பெயர்சி வெப்பநிலையைவிடக் கூடுதலான பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை (23.2K)ப் பெற்றிருக்கின்றது. என்றாலும் இதையும் கூட நீர்ம ஹீலியத்தைப் பயன்படுத்தியே அதன்

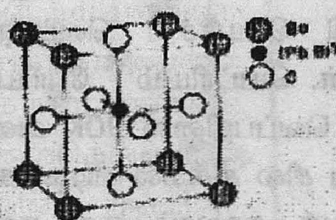
மீக்கடத்தும் நிலையைத் தக்கவைத்துக் கொள்ள வேண்டியிருக்கின்றது. ஹீலியத்தை மாறி மாறி இறுக்கத்திற்கும், விரிவடைதலுக்கும் உள்ளாக்கி நீர்மமாக்குவதால், பேரளவு ஆற்றல் தேவைப்படுகின்றது. ஹீலியக்கசிவு இல்லதவாறு பார்த்துக் கொள்வதுடன், அமைப்பு முழுவதையும் தீவிரமாக வெப்பக் காப்பீடு செய்யப்படவேண்டும்.

1987-ல் மீக்கடத்தியின் வளர்ச்சியில் ஒரு பெரும் மாற்றம் ஏற்பட்டது. பீங்கான் (Ceramic) குடும்பத்தைச் சேர்ந்த சில பொருட்கள், நீர்ம நைட்ரஜனின் கொதி வெப்பநிலையைக் காட்டிலும் கூடுதலான 77K வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் தன்மையுடையனவாக இருப்பதைக் கண்டறிந்தார்கள். நீர்ம நைட்ரஜன் பொருளாதாரச் சிக்கன மிக்கது: எளிதாக எங்கும் கிடைக்கக் கூடியதாகவும் இருக்கின்றது. மேலும் இப்புதிய பீங்கான் பொருட்களை உற்பத்தி செய்வதும் கடுமையான வழிமுறையாக இல்லை.

படிகக் கட்டமைப்பும் உயர்வெப்பநிலை மீக்கடத்தியும்

பீங்கான் பொருட்கள் ஆக்ஸைடுகளின் கலப்பாகும். ஆக்ஸைடுகள் உண்மையில் மின்கடத்தாப் பொருளாகும். இதனால் தொடக்கத்தில் இவை மீக்கடத்தலுக்குப் பயன்படாது என்று நினைத்தார்கள். 1986-ல் லித்தியம், டைட்டானியம் ஆக்ஸைடுகள் பெற்றிருந்த 13.7K என்ற நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையே உயரளவாக இருந்தது. பேரியம் - காரீயம் - பிஸ்மத் மற்றும் ஆக்ஸிஜன் கலப்புள்ள ஒரு கூட்டுப்பொருள் $B_aPb_{1-x}Bi_xO$ ஏறக்குறைய இதே நெடுக்கையில் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைப் பெற்றிருக்கின்றது. இதில் சேர்மான விகிதம் வேறுபட்டவாறு பலவகைப் பொருட்கள் உள்ளன என்றாலும் அவற்றையெல்லாம் ஒரு குடும்பமாக BPBO என்று குறிப்பிடுவர். BPBO-ல் x-ன் மதிப்பை சுழியிலிருந்து 1 வரை மாற்றலாம். அப்போது அதன் மின்னியல் பண்புகளில் குறிப்பிடும் படியான வேறுபாடுகள் காணப்படுகின்றன. x சுழியெனில் BPBO ஓர் அரைகுறையான உலோகம் (semimetal) போலவும், x = 1 எனில் ஒரு குறைக்கடத்தி போலவும் செயல்படுகின்றது. இவ்விரு நிலைகளையும் வரம்பெல்லைகளாகக் கொண்டு x-ன் பிற மதிப்புகளுக்கு BPBO குடும்பத்தைச் சேர்ந்த பல சேர்மப் பொருட்களைப் பெறலாம். முகமையமும், உடல் மையமும் கொண்ட

ஒரு கலப்பு கனச் சதுரப் படிகக் கட்டமைப்பை இவை கொண்டுள்ளன. இதைக் கலப்புக்கன சதுரப் படிகம் (Pervoskite) என்பர்.



படம். 6.25 BPBO-ன் கலப்பு கனச் சதுரப் படிகக் கட்டமைப்பு

x-ன் மதிப்பு 0.35-ஐ விடக் குறைவாக இருக்கும்போது BPBO மீக்கடத்தும் தன்மையை வெளிப்படுத்துகின்றது. பெயர்ச்சி வெப்பநிலையின் மதிப்பு BPBO-ல் உள்ள தனிமங்களின் சேர்க்கை விதிகத்தைப் பெரிதும் சார்ந்திருக்கின்றது. x-ன் மதிப்பு 0.25 ஆக இருக்கும்போது பெயர்ச்சி வெப்பநிலை பெருமமாக இருக்கின்றது. $B_aPb_{0.75}Bi_{0.25}O_3$-ன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 12K ஆகும்.

மீக்கடத்திகளின் படிகக்கட்டமைப்பில் பலவகைகள் காணப்பட்டாலும், சில குறிப்பிட்ட கட்டமைப்பு உயர்வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளுக்கு உகந்ததாகவும், அனுகூலமாகவும் இருக்கின்றன. இக்குறிப்பிட்ட கட்டமைப்புகளைப் பொதுவாக A15 என்று குறிப்பிடுகின்றார்கள். இதுவே பிற்பாடு கலப்புக்கன சதுரப் படிகம் என அறியப்பட்டது.

மீக்கடத்தியான நையோபியம் கலவுற்ற திண்மப் படிகங்களின் கட்டமைப்பு A.15 ஆக உள்ளது. A.15 கட்டமைப்புடன் கூடிய பல இடைநிலை உலோகக் கூட்டு சேர்மங்கள் 25 டிகிரி கெல்வின் வரை பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைப் பெற்றுள்ளன. 1986-ம் ஆண்டுக்குப் பிறகு மீக்கடத்திகள் பற்றிய ஆய்வுகள் நையோபியம் சார்ந்த A15 கட்டமைப்பிலிருந்து விலகி, செம்பு ஆக்ஸைடு சார்ந்த தளமயமான கட்டமைப்பைச் சுற்றி அமைந்தன. இதற்குக் காரணம் உயர்வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளுக்கு இவை கூடுதல் நம்பிக்கையளிப்பதாக இருக்கின்றது.

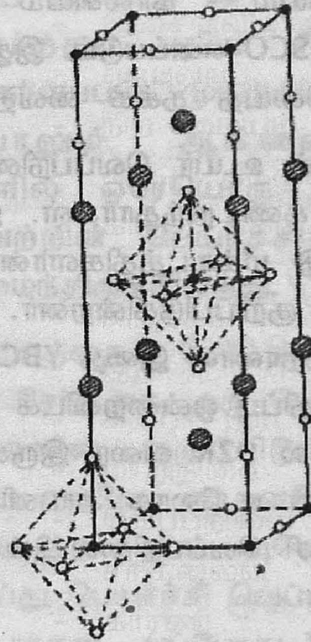
1986-ல் பெல் ஆய்வுக் கூடம் 37K பெயர்ச்சி வெப்பநிலை கொண்ட லாந்தனம், ஸ்டிரான்சியம் மற்றும் செம்பு இவற்றாலான

சிக்கல் படிகத்தை ஆக்ஸிஜன் வெளியில் படிக வளர்ச்சி செய்து உருவாக்கியது. இதன் பிறகு சீன நாட்டு விஞ்ஞானிகள் லாந்தனம், ஈயம், செம்பு ஆக்ஸைடுகளால் ஆன எண்முகங் கொண்ட சிக்கல் படிகங்களை உருவாக்கி பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை 77K வரை உயர்த்திக் காட்டினார்கள். யெட்ரியம் - பேரியம் - செம்பு ஆக்ஸைடு படிகத்தினால் இவ்வரம்பு வெப்பநிலை 90K வரை உயர்த்த முடிந்தது. யெட்ரியம் கலவுற்ற வேறு சில சிக்கல் படிகங்கள் 130 K வரையிலான பெயர்சி வெப்பநிலையைத் தரலாம் என எதிர்பார்க்கின்றார்கள்.

சுவிட்சர்லாந்து நாட்டைச் சேர்ந்த பெட் நோர்ஸ் மற்றும் முல்லர் (Bednorz and Muller) என்ற விஞ்ஞானிகள், ஆக்ஸைடுகள் உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளுக்கு நம்பிக்கை தரக்கூடிய பொருட்கள் என்பதை உறுதி செய்தார்கள். அதன் பிறகு பல உலோக ஆக்ஸைடு கலவுற்ற பல கூட்டுப் பொருட்களை உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளாகக் கண்டறிந்தனர்.

அடிப்படையில் உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளில் செம்பு ஆக்ஸைடு மூலகாரணமாக உள்ளது. இவற்றுள் மூன்று வகைகளை இனமறிந்துள்ளனர். இம் மூவகைகளின் பொதுத் தோற்றம், செம்பு மற்றும் ஆக்ஸைடு அணுக்களாலான, மின்கடத்தும் ஒன்று அல்லது ஒன்றுக்கு மேற்பட்ட படிகத் தளங்களைப் பெற்றிருக்கின்றது.

முதல் வகை மீக் கடத்தியை $La_{2-x}A_xCu\ O_4$ என்ற வேதிக் குறியீட்டால் குறிப்பிடுவர். இதில் La லாந்தனம் என்ற அருமண் உலோகத்தையும் A, பேரியம், ஸ்டிரான்சியம் அல்லது கால்சியம் இவற்றுள் ஏதாவதொன்றையும் குறிக்கின்றன. இதில் ஆக்ஸிஜன், செம்பு அணுக்கள் அடங்கிய கிடைமட்டத் தளங்கள், லாந்தனம் அல்லது ஸ்டிரான்சியம் மற்றும் ஆக்ஸிஜன் அணுக்கள் அடங்கிய பிறதளங்களால் இடைமறிக்கப்பட்டுள்ளன. இதனால் கலப்பு கன செவ்வகப் படிகக் கட்டமைப்பு ஏற்படுகின்றது. இதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 30 டிகிரி கெல்வினாகும்.



படம்.6.26 La-Ba-cu-o மீக்கடத்தியின் படிகக் கட்டமைப்பு

La-Ba-Cu-o மீக்கடத்தியின் மீது அழுத்தத்தைச் செயல்படுத்த அதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை குறிப்பிடும்படியாக அதிகரிக்கின்றது. அழுத்தத்தினால் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை 40-57K வரை அதிகரித்துக் கொள்ள முடிகின்றது. பெரிய அளவுடைய அணுக்களாலான பேரியத்திற்குப் பதிலாகச் சிறிய ஸ்டிரான்சிய அணுக்களைப் படிகக் கட்டமைப்பில் உட்புகுத்தினால், அழுத்தம் ஏதும் செயல்படுத்தாமலேயே 40 டிகிரி கெல்வின் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைப் பெறமுடிகின்றது. இச்சேர்மப் பொருட்களில் மீக்கடத்தும் தன்மை La_2CuO_4-ல் உள்ள செம்பு அயனியின் இணைதிறத் தன்மையோடு தொடர்புடையதாக இருக்கின்றது. இதில் செம்பு +2 என்ற இணைதிற நிலையில் உள்ளது. பேரியம் அல்லது ஸ்டிரான்சியத்தை இதில் சேர்க்கும் போது, அவை சில செம்பு அணுக்களை +3 என்ற இணைதிற நிலைக்கு உந்தித் தள்ளுகின்றன. அதனால் செம்பிற்கு ஒரு கலப்பு இணைதிறன் கிடைக்கின்றது. இது ஆக்ஸிஜன் குறைவிற்கு வழிவகுக்கின்றது. தக்க வழிமுறையைப் பின்பற்றி ஆக்ஸிஜன் வெற்று இட உருவாக்கத்தைக் குறைப்பதினால் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை உயர்வுக்குக் காரணமாகும் செம்பு 3^+ நிலையை அமைப்பில் பாதுகாக்க முடியும்.

பிஸ்மஸ் - ஸ்டிரான்சியம் - கால்சியம் - செம்பு இவற்றின் ஆக்ஸைடுகளின் கலப்பு BSSCO எனப்படும். இது 77 டிகிரி கெல்வின் வரை மீக்கடத்தும் தன்மையைத் தக்க வைத்துக் கொள்கின்றது.

1987-ம் ஆண்டுவாக்கில் உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திக்கான ஒரு புதிய குடும்பத்தைக் கண்டறிந்தார்கள். இரண்டாம் வகைக்கு உட்படும் செம்பு ஆக்ஸைடு மீக்கடத்திகளான இதை $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ என்ற வேதிக் குறியீட்டால் குறிப்பிடுகின்றனர். யெட்ரியம் - பேரியம் - செம்பு – ஆக்ஸிஜன் இவற்றாலான இதை YBCO என்று சுருக்கமாகக் குறிப்பிடுவர். இதில் x-ன் மதிப்பு ஒன்றைவிடக் குறைவாக உள்ளது. இதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 92K வரை இருக்கின்றது. இதிலுள்ள யெட்ரியத்தைப் பிற அருமன் உலோக அயனிகளால் இடப்பெயர்வு செய்தாலும் அதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் குறிப்பிடும் படியான மாற்றம் ஏற்படுவதில்லை.

YBCO மீக்கடத்தி 77K வெப்பநிலையில் 100,000 ஆம்பியர்/மீ^{2} என்ற அளவில் மின்னோட்டச் செறிவைத் தாக்குப் பிடிக்கின்றது. சார்பிலாச் சுழிவெப்பநிலைக்கு வெகு அருகில் இதன் மதிப்பு 10 மடங்கு அதிகமாகும். YBCO மீக்கடத்திகளே நைட்ரஜனின் கொதிநிலைக்கு மேற்பட்ட வெப்பநிலையில் பெயர்ச்சி வெப்பநிலைகளைக் கொண்ட முதலாவதாகக் கண்டறியப்பட்ட மீக்கடத்திகளாகும். $Y_{1.2}Ba_{0.8}Cu_2O_4$ என்ற சேர்க்கைக்கு உட்பட்ட YBCO மீக்கடத்தி 92K வெப்பநிலையில் மீக்கடத்துகின்றது.

YBCO நிலைமாற்றப்படிகளில் வெவ்வேறு படிகக் கட்டமைப்புடன் இரண்டு திண்ம நிலைகளில் இருக்கின்றன. இதில் $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ மட்டுமே மீக்கடத்தும் நிலைக்குக் காரணமாயிருக்கின்றது. இது மூன்று வெவ்வேறு விதமான செவ்வகமுகத் தோற்றத்தின் (Perovskite with orthorhombic) கலப்பாக உள்ளது. இதில் ஆக்ஸிஜன் குறைவு அமைவிடங்கள் அனுகூலமிக்க சிலகுறிப்பிட்ட இடங்களில் தோன்றுவதால் இதன் படிகக்கட்டமைப்பு La-Ba-Cu-O-விலிருந்து மாறுபட்டதாக இருக்கின்றது. $YBa_2Cu_3O_6$ மின்கடத்தாப் பொருளாகவும், $YBa_2Cu_3O_{6.5}$ படிகநிலையில் உலோக-அலோக நிலைகளுக்கிடைப்பட்ட இடைநிலையிலும், $YBa_2Cu_3O_{6.64}$ மற்றம் $YBa_2Cu_3O_7$ மீக்கடத்தியாகவும் இருக்கின்றன.

யெட்ரியத்திற்குப் பதிலாக அருமண் தொகுதித் தனிமங்களில் வேறொன்றைச் சேர்த்துப் புதிய மீக்கடத்திக் குடும்பங்களை உருவாக்க மேற்கொள்ளப்பட்ட முயற்சியில் வெற்றி கண்டுள்ளார்கள். இவை பெரும்பாலும் ஆக்ஸைடுகளைப் பொருத்து நிலைமாற்றப்படிகளில் ஒரேயொரு திண்மநிலையில் மட்டுமே இருக்கின்றன. இவற்றின் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 90K என்ற நெடுக்கையில் அமைந்திருக்கின்றது.

ஹாலஜன் குடும்பத்தைச் சேர்ந்த புளோரின் வினைதிற மிக்க ஒரு தனிமம். இதன் சேர்க்கை, ஒரு பொருளின் கட்டமைப்பு மற்றும் மின்னியல் பண்புகளில் குறிப்பிடும் படியான மாற்றத்தைத் தோற்றுவிக்கின்றது. எனவே ஏற்கனவே அறியப்பட்டுள்ள உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளில் புளோரினை ஊட்டி அதாவது புளோரினேற்றம் செய்து பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை மேலும் உயர்த்த ஆய்வு மேற்கொண்டார்கள். அப்போது $Y_1Ba_2Cu_3F_2O_x$ என்ற பீங்கான் பொருள் 155K வெப்பநிலையில் மீக்கடத்துவதாக அறிவித்தார்கள், எனினும் இது மறுபடி செய்யப்பட்ட சோதனைகள் மூலம் ஐயத்திற்கிடமின்றி மெய்ப்பிக்கப்படவில்லை.

மூன்றாம் வகையைச் சேர்ந்த செம்பு ஆக்ஸைடு மீக்கடத்தி கொஞ்சம் சிக்கலான கட்டமைப்பைக் கொண்டுள்ளது. இது $Tl_1Ca_{n-1}Ba_2Cu_nO_{2n+3}$ என்று குறிப்பிடப்படுகின்ற ஒற்றை தாலியம்-ஆக்ஸஜின் தளங்கள் கொண்ட சேர்மானப்பொருளாகவோ, $Tl_2Ca_{n-1}Ba_2Cu_nO_{2n+4}$ என்று குறிப்பிடப்படுகின்ற இரட்டை, தாலியம் - ஆக்ஸிஜன் தளங்கள் கொண்டு சேர்மானப் பொருளாகவோ இருக்கமுடியும். இதில் n என்பது செம்பு – ஆக்ஸிஜன் தளங்களின் எண்ணிக்கையாகும். இதை மாற்றி அமைத்துக்கொள்ள முடியும் என்றாலும் அதிக அளவாக மூன்று தளங்கள் மட்டுமே இருக்க முடியும். தாலியத்தை, பிஸ்மத் தனிமத்தால் பதிலீடு செய்ய இவ்வகையைச் சேர்ந்த மற்றொரு மீக்கடத்தி குடும்பத்தைப் பெறமுடிகின்றது. இவ்வகை மீக்கடத்திகளின் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை, தளங்களின் எண்ணிக்கை அதிகரிக்க, அதிகரித்தாலும், குறிப்பிட்ட எண்ணிக்கைக்கு அப்பால் குறைகின்றது. $Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ [TBCCO]-ன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 120K நெடுக்கையில் உள்ளது.

$La_{2-x}Sr_xCuO_4$ $Bi_2(CaSr)_3Cu_2O_y$ போன்ற செம்பு ஆக்ஸைடு மீக்கடத்திகளும் 100 K-க்கு மேல் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையைக்

கொண்டுள்ளன. முன்னதில் x-ன் மதிப்பு 0.2-க்கும் குறைவு, பின்னதில் y-ன் மதிப்பு, மீக்கடத்திப் பொருளின் படிகக்கட்டமைப்பின் நிலைப்புத் தன்மைக்கு ஏற்ற மாறுபடுகின்றது.

அண்மையில் ஜப்பான் நாட்டு விஞ்ஞானியான ஓகுஸி (T.Ogushi) குழுவினர் செம்பு சேர்க்கையில்லாத உயர்வெப்பநிலை மீக்கடத்தி மூலப் பொருளைக் கண்டறிந்துள்ளனர். La-Sr-Nb-O என்று குறிப்பிடப்படும் இதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 255 K அளவில் உள்ளது. La-Sr-Nb-O மற்றும் Y-Sr-Nb-O போன்ற செம்பு சேர்க்கையில்லாத மீக்கடத்திகள் அறை வெப்பநிலையில் மீக்கடத்தும் தன்மை கொண்ட மூலப்பொருளைத் தரலாம் என நம்பிக்கை தெரிவித்துள்ளனர்.

உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளை வேறுசில வழிமுறைகள் மூலமும் உண்டாக்க முடியும். 60 கார்பன் அணுக்களைக் கொண்டு ஒரு கோளவடிவ மூலக்கூறு ஒன்றைச் செயற்கையாக உருவாக்கமுடியும். C_{60}-ல் என்று குறிப்பிடப்படுகின்ற இதை கோள மூலக்கூறு (Bucky ball) என்பர். இதில் ஏதாவதொரு காரமண் அணுக்களைச் சேர்த்து கலப்புண்டாக்கும் போது, அது மின் கடத்தலுக்கு உதவக்கூடிய கட்டற்ற எலக்ட்ரான்களைத் தருகின்றது. C_{60}-ல் ரோ்க்கப்படும் வேற்று அணுக்களின் எண்ணிக்கையை மாற்றி பெயர்ச்சி வெப்பநிலையை உயர்த்திக் கொள்ளமுடியும். இதன் மூலம் 52 டிகிரி கெல்வின் வரை பெயர்ச்சி வெப்பநிலை கொண்ட மீக்கடத்திகளை உருவாக்கியிருக்கின்றார்கள்.

மக்னீசியம் டைபோரைடு ($Mg B_2$), 2001-ல் ஜப்பான் நாட்டில் மீக்கடத்தியாகக் கண்டறியப்பட்டது. இது வெறும் இரு தனிமங்களால் ஆனதாக இருப்பதாலும், இதை எளிதாக உற்பத்தி செய்ய முடிவதாலும், இதன் பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 39 டிகிரி கெல்வினாக இருப்பினும், பல உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகளுக்கு உகந்த மாற்றுப் பொருளாக விளங்குகின்றது.

மீக்கடத்திகளின் பயன்பாடு அவை பெற்றிருக்கும் பல சிறப்புப் பண்புகளினால் விரிவடைந்து கொண்டே வருகின்றது. தொழில் நுட்பத் துறைகள், பொறியியல், மருத்துவம், கணினி போன்ற துறைகள் இவற்றின் பயன்பாட்டினால் வியத்தகு மாற்றங்களையும், முடுக்கப்பட்ட வளர்ச்சி வீதத்தையும் பெற்று வருகின்றன. அறை வெப்பநிலையில்

மீக்கடத்திகளின் கண்டுபிடிப்பு பெரிய அளவில் மாற்றத்தைத் தூண்டும் என எதிர்பார்க்கின்றார்கள்.

மீக்கடத்தியின் பயன்கள்

மீக்கடத்திகளின் பயன்கள் அண்மைக் காலத்தில் பல துறைகளிலும் விரிவுபடுத்தப்பட்டு வருகின்றன என்றாலும் அவற்றின் முக்கியப் பயன் மின்காந்தம்தான். இயற்கையாகக் கிடைக்கும் காந்தத்தின் வலிமையை அதிகரிக்க முடியாததால் செயற்கைக் காந்தமான மின்காந்தங்கள் உருவாக்கப்பட்டன. சோதனைக் கூடங்களில் பயன்படுத்தப்படும் சட்டக் காந்தங்களைக் கொண்டு 0.1டெஸ்லா [1டெஸ்லா = 10^4 காஸ்] அளவு வலிமையுள்ள காந்தப்புலத்தைப் பெறவியலும். இது உயர் ஆராய்ச்சிகளுக்கும், அகன்ற காந்தப்புலவெளியை ஏற்படுத்துவதற்கும் போதுமானதாக இல்லை. சற்று வலிமைமிக்க காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிப்பதற்கு இன்று மின்காந்தங்களே பயன் தருகின்றன. மென் இரும்பாலான உள்ளகத்தை மின்கம்பியில் சுற்றி, அதன் வழியாக ஒரு திசை மின்னோட்டத்தை ஏற்படுத்த உள்ளகம் காந்தமாகிவிடுகின்றது. இதுவே மின்காந்தமாகும். இது 5-10 டெஸ்லா வரையிலுள்ள காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கவல்லன. மின்காந்தங்களினால் தோற்றுவிக்கப்படும் காந்தப்புலத்தின் வலிமை, கம்பிச்சுற்றுகளின் எண்ணிக்கை மற்றும் அதன் வழிச் செல்லும் மின்னோட்டத்தின் மதிப்பு இவற்றைப் பொருத்தது.

இதற்கு அப்பாலும் காந்தப் புலத்தின் வலிமையை அதிகரிக்க மின்னோட்டத்தின் மதிப்பையோ அல்லது கம்பிச் சுற்றுகளின் எண்ணிக்கையையோ அதிகரிப்பதால் பெற முடியாது. மின்கம்பியில் ஏற்படும் ஆற்றல் இழப்பு, அதன் வழிச் செல்லும் மின்னோட்டத்தின் இருமடிக்கு நேர் விகிதத்திலிருக்கின்றது. எனவே மின்னோட்டத்தின் மதிப்பை உயர்த்தும்போது ஆற்றல் இழப்பு அதிகரித்து மின்கம்பி உருகிப்போய்விடலாம். மின்கம்பிச் சுற்றுகளின் எண்ணிக்கையை அதிகரிக்கும்போது, மொத்த மின்தடை அதிகரித்து, அதனால் சுற்றில் ஏற்படும் மின்னோட்டத்தின் அளவு குறையலாம். இக்குறைபாட்டினால் மின்காந்தங்களின் காந்தப்புலச் செறிவு ஒரு பெரும மதிப்பிற்கு உட்பட்டிருக்கின்றது.

சாதாரண மின்கம்பிகளுக்குப் பதிலாக மீக்கடத்தியாலான மின்கம்பிகளைப் பயன்படுத்தும் போது இக்குறைபாடுகள் சிறிதுமில்லை. அதனால் மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களைக் கொண்டு வரம்பில்லாத உயர்காந்தப் புலத்தைத் தோற்றுவிக்க முடியும் இவை 100 டெஸ்லா வரை காந்தப்புலத்தைத் தோற்றுவிக்கவல்லன.

தோற்றுவிக்கப்படும் காந்தப்புல வலிமையின் பெருமம் உயர உயர, உயர் ஆற்றல் இயற்பியலில் புதிய அடிப்படைத் துகள்களின் கண்டுபிடிப்புகள் தோன்றிக் கொண்டேயிருக்கின்றன என்றும், திண்மப் பொருள் இயற்பியலில் புதிய விளைவுகள் கண்டுபிடிக்கப்பட்டு விளக்கம் பெறுகின்றன என்றும், தொழில் நுட்பத் துறையில் புதிய சாதனங்களும், கருவிகளும் படைக்கப்பட்டு பல துறைகளும் வளர்ச்சி பெறுகின்றன என்றும் மருத்துவத் துறையில் புதிய் அணுகுமுறைகள் பின்பற்றப்படுகின்றன என்றும் விஞ்ஞானிகள் குறிப்பிட்டுள்ளார்கள். இதனால் மீக்கடத்திகளை அறிவியல் மற்றும் தொழில்நுட்பத் துறைகளின் வளர்ச்சிக்கான நெம்புகோல் என வியந்துரைக்கின்றனர்.

மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களினால், காந்தப்புலம் பயன்படுத்தப்படுகின்ற பல அமைப்புகளின் வடிவமைப்பைச் சிறியதாக்கிக் கொள்ளமுடிகின்றது. துகள் முடுக்கும் பொறிகள், எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கி, காந்தப்பாய்ம இயக்க மின் இயற்றி, பிளாஸ்மாவை நிலைப்படுத்துதல், அணுக்கருக் காந்த ஒத்ததிர்வு மூலம் நிழலுரு வடித்தல் போன்றவற்றைக் குறிப்பிட்டுச் சொல்லலாம்.

சைக்ளோட்ரான், சிங்ரோ சைக்ளோட்ரான், பீட்டாட்ரான், பீவாட்ரான், காஸ்மோட்ரான் போன்ற பல துகள் முடுக்கும் பொறிகளில் மின்காந்தத்தின் துணைகொண்டு, முடுக்கப்படும் துகள் நேர்கோட்டில் செல்லாது ஒருவட்ட வளையப் பாதையில் செல்லுமாறு செய்கின்றார்கள். காந்தப்புலத்தின் வலிமை அதிகமானால் இந்த வட்ட வளையப் பாதையின் ஆரம் குறையும் என்பதால் பொறிகளைச் சிறியதாக்கிக் கொள்ள முடிகின்றது. மேலும் அதே அமைப்பில் அதிகமான வட்டவளையப் பாதையை ஏற்படுத்த முடிவதால், முடுக்கப்படும் துகளின் பெரும ஆற்றலும் அதிகமாக இருக்கின்றது.

எலக்ட்ரான் நுண்ணோக்கிகளில் எலக்ட்ரானின் அலைப்பண்பு பயன்படுகின்றது. நுண்ணிய இடைவெளியிடன் கூடிய கட்டமைப்பைத் துலக்க, எலக்ட்ரான் அலையின் அலைநீளம் அந்த இடைவெளியின்

நெடுக்கையில் இருக்கவேண்டும். அதாவது அதன் உந்தமும் ஆற்றலும் அதிகமாக இருக்கவேண்டும். உயர் ஆற்றலுடைய எலக்ட்ரான்களைக் குவியத்தில் குவிப்பதற்கு உயர் காந்தப்புலமுடைய காந்தவில்லைகள் தேவை. இதற்கு அனுகூலமாயிருப்பது மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களே.

பிளாஸ்மாவை ஒரு சிறிய துளை வழியே மிக விரைவாகச் செலுத்தி, காந்த இரு முனைகளுக்கிடையே குறுகிய இடைவெளியில் கடந்து செல்லுமாறு செய்ய, அவ்வெளியில் இரு வேறு புள்ளிகளுக்கிடையே ஒரு மின்னழுத்த வேறுபாடு எழுகின்றது. இந்த மின்னியக்கு விசையை மின்னாற்றலாகப் பயன்படுத்தமுடியும். காந்தப் பாய்ம வியக்கத்திற்குப் பயன்தரக் கூடிய பிளாஸ்மா குறைந்தது 2300-2400 K வெப்பநிலையிலும், காந்தப்புல வெளியில் பாய்ந்து செல்லும் வேகம் சுமார் 1கி.மீ / வினாடி என்ற அளவிலும் இருக்கவேண்டும். காந்தப்புல பாய்மத்தின் உயர் பயனுறு திறனுக்கு இவ்விரு நிபந்தனைகளும் முக்கியமானது. இந்தப் பிளாஸ்மாவை நிலைப்படுத்தி வைத்திருக்கவும், காந்தப்புல பாய்ம வியக்கத்திற்குத் தேவையான உயர்காந்தப்புலத்தைப் பயன்படுத்தவும் மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்கள் நற்பயனளிக்கின்றன.

அணுக்கருப் பிளப்பு வினை போலன்றி, அணுக்கருப் பிணைப்பு வினைகள் கதிர்வீச்சால் மாசுபடுத்தாது என்பதாலும், பொருளாதாரச் சிக்கன முறையில் மூலப் பொருட்களைப் பெறமுடிவதாலும், கூடுதலாக ஆற்றலைப் பெற்றுப் பயனுறு திறனை அதிகரிக்கமுடிவதாலும் கருப்பிணைப்பு அனுகூலமிக்கது. எனினும் இதில் மூலப்பொருள் உயர்வெப்பநிலையில் பிளாஸ்மா நிலையில் இருக்கும். மின்பொதிமங்களாலான துகள்களைக் கொண்ட பிளாஸ்மாவை நிலைப்படுத்த உயர்காந்தப்புலம் தேவை. ஒரு காந்தப்புலத்தைப் பிளாஸ்மா உள்ள கொள்கலனின் அச்சுத் திசையில் செயல்படுமாறு செய்தால் அச்சைவிட்டுக் கொள்கலனின் சுவர் பக்மாகச் விலகிச் செல்லும் துகள்கள் வளைவாரப் பாதையில் செலுத்தி மீண்டும் அச்சை ஒட்டி இயங்குமாறு செய்கின்றது. இத்தகைய அமைப்பைக் காந்தப் புட்டி (magnetic bottle) என்பர். இதில் பயன்படுத்தப்படும் மின்சுருள் மீக்கடத்தியாக இருந்தால் வலிமையான காந்தப்புலத்தால் பிளாஸ்மாவை ஒரு குறுகிய வெளியில் நிலைப்படுத்த முடிகின்றது.

அணுக்கரு காந்த ஒத்ததிர்வு மூலம் நிழலுருவடித்தல் (Nuclear magnetic resonance imaging device) மருத்துவ மனைகளில் உடல் உறுப்புகளை வரிக் கண்ணோட்டத்தின் மூலம் (Scanning) அறிந்து கொள்ளப் பயன்படுத்தப்படுகின்றது. இதன் மூலம் உயிரியல் மூலக்கூறுகளின் கட்டமைப்பை அறியமுடியும். உயிரியல் மூலக்கூறுகள் இயல்பான நிலையில் உள்ளனவா, இல்லை திரிவுற்ற நிலையில் உள்ளனவா என்பதைக் கண்டறிந்து கொள்ள முடிவதால், புற்றுநோய் பற்றிய ஆய்வுகளுக்கு இவை பெரிதும் துணைபுரிகின்றன.

காந்த விசைகளைக் கொண்டு பெரோ காந்தத் தாதுவிலிருந்து பெரோ காந்தத் தனிமங்களைப் பிரித்தெடுக்க முடியும். இதற்கு மீக் கடத்தும் மின்காந்தங்கள் பயன் தருகின்றன. காந்த வடிப்பான்களிலும் (magnetic filter) மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களைப் பயன்படுத்தி கதிரியக்கக் கழிவுப் பொருட்களை இனங்கண்டு பிரித்தெடுக்கலாம். ஆலைகளின் புகைப்போக்கியிலிருந்து வெளியேறி வளிமண்டலத்தை மாசுபடுத்தும் சிலவகைத் துகள்களைக் கட்டுப்படுத்தலாம். அணு உலைகளில் நீண்ட காலம் பயன்பட்டுச் சீரழிந்த யுரேனியம் மற்றும் புளுட்டோனியத் தண்டுகளைச் சுத்தம் செய்து மீண்டும் பயன்படுத்தக்கூடிய வகையிலான தண்டுகளை உருவாக்கும் ஆலைகளில் காந்த வடிப்பான்கள் பயன்தருகின்றன.

காந்த விசையைக் கொண்டு நீரைச் சுத்தப்படுத்தமுடியும். கடல் நீரைக் குடிநீராக்கும் வழிமுறையில் உயர்காந்தப்புலத்தைப் பயன்படுத்திப் பயனுறு திறனை அதிகரித்துக் கொள்ள முடியும்.

செயற்கைக் கோள்களை வட்டப் பாதையில் பூமியைச் சுற்றிவருமாறு ஏவுவதற்கு ஏவூர்திகள் இன்றியமையாதன. மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களினால் உண்டாக்கப்படும் உந்து விசையைக் கொண்டு செயற்கைக் கோள்களை ஏவூர்திகளின்றியே ஏவ இயலும். இவ்வழிமுறை வரும் எதிர்காலத்தில் சாத்தியமாகலாம் என்று விஞ்ஞானிகள் நம்பிக்கை தெரிவித்துள்ளனர்.

மீக்கடத்தும் காந்தங்களின் முக்கியப் பயன்களுள் ஒன்று அந்தரத்தில் மிதத்தல் (levitation) ஆகும். மீக்கடத்தும் மின்காந்தங்களைக் கொண்டு ஒரு பொருளை ஈர்ப்புக்கு எதிராகச் சற்று உயரே தூக்குவது என்பது இயலுவதால், சக்கரங்களற்ற

அதிவேக இரயில் வண்டிகளை இயக்குவது நடைமுறைச் சாத்தியமாகின்றது. உராய்வினால் ஏற்படும் ஆற்றல் இழப்பு, பொருள் தேய்மானம் போன்றவை தவிர்க்கப்படுவதாலும், நீண்ட தொலைவை மிகக் குறுகிய காலத்தில் பயணம் செய்ய முடிவதாலும் இது அனுகூலமிக்கதாய் இருக்கின்றது.

மீக்கடத்திகளின் முழுமையான டயா காந்தப்பண்பு காந்த அந்தரவியக்கத்திற்கு அடிப்படையாக உள்ளது. மீக்கடத்தும் நிலையில் மீக்கடத்தும் பொருளாலான ஒரு வட்டத்தட்டு, ஒரு கிடைமட்டமான சட்டக் காந்தத்திற்குக் கீழாக இருக்குமாறு வைக்கப்பட்டுள்ளது. இந்த சட்டக் காந்தம் நெகிழ்விணக்கம் கொண்ட ஒரு சங்கிலியால் தொங்கவிடப்பட்டு, மீக்கடத்தும் பொருளாலான தட்டிற்கு மேலாக இருக்குமாறு சரி செய்யப்பட்டுள்ளது. இந்த காந்தச் சட்டம் மீக்கடத்தியை நோக்கி நெருங்கி வரும்போது அல்லது விலகிச் செல்லும் போது மீக்கடத்தியோடு தொடர்புடைய காந்தப்பாயத்தை மாற்றத்திற்கு உள்ளாக்குகின்றது. இதனால் மீக்கடத்தியில் ஒரு மின்னோட்டம் தூண்டப்படுகின்றது. அதன் மின்தடை சுழியாக இருப்பதால், அதன் செறிவு தாழ்வுறாமல் நிலைத்திருக்க, அதனால் தோற்றுவிக்கப்படும் காந்தப்புலம், அதற்கு மூல காரணமாக இருந்த காந்தச் சட்டத்தை விலக்க முற்படுகின்றது. இது காந்தச் சட்டத்தை சற்று உயரே தூக்குகின்றது. அப்போது ஆடியில் வரும் பிம்பம்போல மீக்கடத்தியில் காந்த பிம்பம் (Magnetic mirror image) உருவாகின்றது. அதாவது சட்டக் காந்தத்தில் வடமுனைக்குக் கீழாக வடமுனையும், தென் முனைக்குக் கீழாகத் தென்முனையும் மீக்கடத்தியில் தூண்டப்படுகின்றன. இந்தக் காந்த பிம்பம் சட்ட காந்தத்தின் இடப்பெயர்சியோடு நகருகின்றது. அப்போது அந்த வட்டத் தட்டுக் காந்தம் அந்தரத்தில் மிதவலாக இருப்பதுடன், விரைவாகவும் தற்சுழல்கின்றது. உராய்வு ஏதுமில்லாததால் இது மிகக் குறைந்த இயக்கத் தடையுடன் தொடர்ந்து தற்சுழல்கின்றது. இதைச் சுற்றியுள்ள வெளியிலுள்ள காற்றின் அழுத்தத்தை குறைக்கும்போது வட்டத்தட்டுக் காந்தத்தை இன்னும் சற்று கூடுதலான உயரத்திற்குத் தூக்க முடிகின்றது. தண்டவாளத்தை விட்டு சற்று உயரத்தில் மிதவலாக இருப்பதால், இரயில் வண்டியை விரைந்த வேகத்தில் இயக்குகின்றார்கள்.

மீக்கடத்திகளின் பயன்களில் மீக்கடத்தும் மின்னியற்றி (superconducting geneator), மின்சாரத்தைக் கடத்தி எடுத்துச் செல்லும் மின்கம்பிகள், மற்றும் மின்வடங்கள் முக்கியமானவை.

ac ஜோசப்சன் விளைவைப் பயன்படுத்தி, மின்னழுத்த அலகான வோல்ட்-ஐ வரையறுத்துள்ளனர். இதன்படி ஒரு வோல்ட் என்பது (483593420 மெகாஹெர்ட்ஸ்) h/2e ஆகும். ac ஜோசப்சன் விளைவைக் கொண்டு தாழ்ந்த வெப்பநிலைகளை அளவிட முடிகின்றது. வெப்பநிலைக்கு ஏற்ப உமிழப்படும் கதிர்வீச்சின் அதிர்வெண்ணில் ஏற்படும் மாற்றம் இதற்கு அடிப்படையாக உள்ளது.

ஸ்குட், கிரையோட்ரான் போன்ற மீக்கடத்தி சாதனங்களும் மீக்கடத்திகளின் பயன்பாடேயாகும். உணர்திறன் மிக்க ஸ்குட் இதய அலை வரைவி, மூளை அலைவரைவி, இரத்தப் பாய்வு வீத வரைவி போன்ற பல மருத்துவ சாதனங்களில் பயன்படுகின்றது.

மாதிரிக் கணக்கு

1. காரீயத்தின் மீக்கடத்து நிலைக்கான பெயர்ச்சி வெப்பநிலை 7.26K. சார்பிலாச் சுழிவெப்பநிலையில் மாறுநிலைக் காந்தப்புலம் 64×10^3 ஆம்பியர்/மீ என்றால் 5K வெப்பநிலையில் அதன் மாறுநிலைக் காந்தப்புலத்தின் மதிப்பு என்ன?

$$H = H_o [1 - T^2/T_c^2]$$

என்பதால்

$$H = 64 \times 10^3 [1-(5 / 7.26)^2] = 33.64 \times 10^3 \text{ ஆ / மீ}$$

2. செயல்படும் மின்னழுத்தம் 1mV எனில், ஜோசப்சன் சந்திப்பினால் உண்டாக்கப்படும் நுண்ணலையின் அதிர்வெண்ணைக் கணக்கிடுக.

$$\upsilon = \frac{2eV}{h} = \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-3}}{6.626 \times 10^{-34}} = 483 \times 10^9 \text{ Hz}$$

3. 4.2K வெப்பநிலையில் 1மி.மீ விட்டமுடைய ஈயக்கம்பியின் மாறுநிலை மின்னோட்டச் செறிவைக் கணக்கிடுக. H_C, வெப்பநிலையுடன் ஒரு பரவளையத் தொடர்பு இருப்பதாகவும்

$T_c = 7.18K$ ஆகவும் $H_o = 6.5 \times 10^4 A/m$ ஆகவும் கொள்ளப்பட்டுள்ளது.

$H_c = H_o[1-(T/T_c)^2]$

$= 6.5 \times 10^4 [1-(4.2/7.18)^2] = 4.2759 \times 10^4 A/m.$

$I_c = (2\pi r) H_c$ என்பதால்

$$Jc = \frac{I_c}{A} = \frac{2\pi r H_c}{\pi r^2} = \frac{2Hc}{r} = \frac{2x4.2759 \times 10^4}{0.5x10^{-3}}$$

$=1.71x10^8 A/m^2$

கேள்விகளும் பயிற்சிக் கணக்குகளும்

1. மீக்கடத்தும் திறன் என்றால் என்ன? மீக்கடத்திகளின் பல சிறப்பியல்புகளையும் தெரிவிக்கவும்.
2. மெய்ஸ்னர் விளைவு பற்றி விளக்குக. அதன் மூலம் மீக்கடத்திகளை எங்ஙனம் வகைப்படுத்தியுள்ளனர் என்பதை விவரிக்க.
3. மீக்கடத்திகள் முழுமையான டயாகாந்தமாக உள்ளன என்பதை எங்ஙனம் புலப்படுத்திக் காட்டுவாய்?
4. மீக்கடத்தி மீது புறக்காந்தப்புலம் ஏற்படுத்தும் தாக்கம் பற்றி விவரி.
5. மீக்கடத்தும் தன்மை எங்ஙனம் புறக்காந்தப்புலம், மற்றும் பாயும் மின்னோட்டத்தால் பாதிக்கப்படுகின்றது?
6. மீக்கடத்திகளில் சம அணுஎண்ம விளைவு பற்றிச் சிறுகுறிப்பு வரைக
7. மீக்கடத்திகளின் வெப்ப இயக்கப் பண்புகளைப் பற்றிக் கூறுக நிலைமாற்றுப் பெயர்ச்சி வெப்பநிலையில் இயல்பு மற்றும் மீக்கடத்தும் நிலைகளின என்ட்ரோபி சமம் எனக் காட்டுக.
8. மீக்கடத்தும் நிலையில் வெப்பஏற்புத் திறனுக்கும், இயல்பு நிலையில் வெப்பஏற்புத் திறனுக்கும் உள்ள வேறுபாட்டிற்கான ஒரு தொடர்பை வருவி.
9. மீக்கடத்திகளில் ஆற்றல் இடைவெளி பற்றி சிறுகுறிப்புத் தருக.
10. மீக்கடத்திகளுக்கான இலண்டனார் கொள்கையை விளக்கி இலண்டனார் ஊடுருவல் ஆழத்திற்கான ஒரு தொடர்பைப் பெறுக.

11. இலண்டனார் முதல் மற்றும் இரண்டாம் சமன்பாடுகளைப் பெற்று அதன் மூலம் மெய்ஸ்னர் விளைவை விளக்குக.

12. இலண்டனார் கொள்கை மூலம் பாயும் மின்னோட்டத்தின் செறிவும், செயல்படும் காந்தப்பாயச் செறிவும் எங்ஙனம் புறத்தளத்திலிருந்து ஆழத்திற்கு ஏற்ப மாறுபடுகின்றன என்பதை விவரிக்க.

13. உயர் அதிர்வெண் நெடுக்கையில் மீக்கடத்தும் தன்மை பற்றி விவரிக்க.

14. இலண்டனார் ஊடுருவல் ஆழத்திற்கும் புறத்தளப்பாய் வாழத்திற்கும் உள்ள தொடர்பு யாது?

15. இலண்டனார் கொள்கையின் குறைபாடுகள் யாவை?

16. BCS கொள்கையின் முக்கியக் கூற்றுகள் என்ன?

17. கூப்பர் இணை என்றால் என்ன? மீக்கடத்திக்கான BCS கொள்கையைக் கொண்டு ஆற்றல் இடைவெளிக்கான ஒரு தொடர்பைப் பெறுக.

18. மீக்கடத்திகளில் ஊடுபாய்வு பற்றி ஒரு சிறுகுறிப்பு வரைக.

19. கெய்வர் ஊடுபாய்விற்கும் ஜோசப்சன் விளைவிற்கும் உள்ள வேறுபாடு யாது?

20. ஜோசப்சன் விளைவு என்றால் என்ன? dc மற்றும் ac ஜோசப்சன் விளைவுகளைப் பற்றிக் கூறுக. தக்க தொடர்புகளைப் பெற்று அவற்றை விளக்குக.

21. ஸ்குட் பற்றிச் சிறுகுறிப்பு வரைக.

22. மீக்கடத்தியின் பயன்பாட்டாலான இரு சாதனங்களைப் பற்றி விவரித்துக் கூறு

23. உயர் வெப்பநிலை மீக்கடத்திகள் பற்றிய கருத்துக்களைத் தொகுத்துக் கூறுக.

24. மென் மற்றும் வன்மீக்கடத்திகளின் பண்புகளைக் கூறுக. இலண்டனார் சமன்பாட்டை வருவித்து, மீக்கடத்தும் நிலையை எங்ஙனம் விளக்குவாய்.

25. BCS கொள்கை எங்ஙனம் சம அணுஎண்ம விளைவை விளக்குகின்றது?

26. BCS கொள்கையின் அடிப்படைக்கருத்துகளை விளக்கி மீக்கடத்தும் நிலைக்கான நிபந்தனைகள் மூலம் மீக்கடத்தும் தன்மையை விவரிக்க

27. மீக்கடத்தியின் பயன்கள் பற்றி விவரி

28. மாறுநிலை வெப்பநிலை, மாறுநிலைகாந்தப்புலம் - வரையறு.

பார்வை நூல்கள்

1. **C. Kittel**, *Introduction to Solid State Physics*, 3rd edition, Wiley Eastern, New Delhi, 1977.

2. **N.W. Ashroff and N.D. Mermin**, *Solid State Physics*, Holt, Rinehart and Winsten, Philadelphia.

3. **J.S. Blackmore**, *Solid State Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1974.

4. **S.O. Pillai**, *Solid State Physics*, New Age International, New Delhi, 1995.

5. **Wahab**, *Solid State Physics*, Narosa Publications, New Delhi.

6. **B.S. Saxena, R.C. Gupta and P.N. Saxena**, *Solid State Physics*, Pragati Prakashan, Meerut, 2004.

7. **A.J. Dekker**, *Solid State Physics*, MC. Millan, 1971.

கலைச்சொற்கள்

absorption - உட்கவர்தல், உறத்தல்
- band - உட்கவர் பட்டை
- coefficient - உட்கவர் குணகம்
- edge - உட்கவர் விளிம்பு
- lines - உட்கவர் வரிகள்
- spectrum - உட்கவர் நிறமாலை
absorptive power - உட்கவர் திறன்
abundance - செழிப்பு
acceptor - ஏற்பன், மின்துளையூட்டி
- level - ஏற்பன் (ஆற்றல்) நிலை
accessible - அணுகத்தக்க
active - செயலுறு, வீரிய
adiabatic - வெப்ப மாற்றீடற்ற
- approximation - தோராயம்
- demagnetisation - காந்தநீக்கம்
alloy - கலப்பு உலோகம்
anisotropy - திசையொவ்வாப் பண்பு
antiferro magnetism - எதிர்பெரோ காந்தம்
எதிர் இரும்பியல் காந்தம்
binding energy - பிணைப்பாற்றல்
Bloch wall - பிளோக் சுவர்
bond - பிணைப்பு
- covalent - சக
- ionic - அயனி
Boson - போசான்
broadening - அகல் விரிவு
Brillouin zone - பிரிலோயின் மண்டலம்
bypass - குறுக்குப் பாய்வு
catalyst - வினையூக்கி
cavity - உட்குழிவு
cell - நுண்ணறை
ceramic - பீங்கான்

charge carriers	-	மின்பொதிமங்கள்
coherence length	-	இசைவுவினைத்தொலைவு
collector	-	ஏற்புவாய்
colour centre	-	நிற மையம்
coercive force	-	காந்த நீக்குவிசை
coercivity	-	காந்த நீக்குதிறன்
condensation	-	உறைவூட்டம், உறைமைச் சுருக்கம், வளிமச் செறிவிப்பு
compressibility	-	இறுகுதிறன்
Cooper pair	-	கூப்பர் இரட்டை
critical	-	மாறுநிலை
- temperature	-	வெப்பநிலை
degeneracy	-	சீர்குலைவு
- factor	-	காரணி
- strong	-	வன்
- weak	-	மென்
degrees of freedom	-	தன்னியக்கப் படிகள்
defect	-	குறைபாடு
density	-	அடர்த்தி
diamagnetism	-	டயா காந்தம்
dielectric	-	மின்கடத்தாப் பொருள்
- constant	-	மாறிலி
- loss	-	இழப்பு
diffusion	-	ஊடுபரவல்
disorder	-	ஒழுங்கின்மை
displacement current	-	இடப்பெயர்வு மின்னோட்டம்
distribution	-	பங்கீட்டுத்தனம்
distortion	-	உருக்குலைவு
donor	-	கொடுப்பான், ஈனுறு வேற்றுப்பொருள்
doping technique	-	வேற்றுப்பொருள் கலவைமுறை
Doppler shift	-	டாப்ளர் பெயர்ச்சி
efficiency	-	பயனுறுதிறன்
element	-	தனிமம்

energy gap - ஆற்றலிடைவெளி, ஆற்றல் மறுப்புவெளி
entropy - என்ட்ரோபி
equipartition - சமப்பகிர்வு
exciton - எக்சைட்டான், கிளர்மம்
extrinsic - புறவியலான
Fermion - பெர்மியான்
Fermi pressure - பெர்மி அழுத்தம்
- energy - ஆற்றல்
- surface - பரப்பு
ferri magnetism - பெரி காந்தம் இடைநிலை இரும்பியல் காந்தம்
ferro magnetism - பெரோ காந்தம் இரும்பியல் காந்தம்
fluorescence - உடனொளிர்தல்
flux - பாயம்
fluxoid - பாயன்
free electron - கட்டற்ற எலக்ட்ரான், தனி எலக்ட்ரான்
free energy - இயலாற்றல்
free radical - பகுதி மூலக்கூறு
frequency - அதிர்வெண்
gain - ஆதாய ஈட்டு
heat capacity - வெப்ப ஏற்புத்திறன்
hole - நேர் மின்மம், மின்துளை
hybridisation - இனக்கலப்பாக்கம்
hysteresis - தயக்கக்கண்ணி
ideal - இலட்சிய
impurity - வேற்றுப்பொருள்
infra red - அகச்சிவப்பு
insulation - ஏமப்பொருள், ஏமக்காப்பு
intensity - செறிவு
intrinsic - உள்ளார்ந்த
ion - அயனி
ionization - அயனியாக்கம்

isobar - சம அணுநிறைமம்
isotope - சம அணு எண்மம்
isotopic effect - சம அணு எண்ம விளைவு
kinetic energy - இயக்க ஆற்றல்
lattice - அணித்தளம், அணிக்கோவை
levitation - அந்தரவியக்கம்
lone pair - துணையற்ற ஜோடி
luminosity - ஒளிர்திறன்
Magnetisation - காந்தமாக்கம்
magnetic domain - காந்தவயல், காந்தத்திட்டு
- dipole - இருமனை
- flux - பாயம்
- susceptibility - ஏற்புத்திறன்
magnon - மாக்னான்
mechanical properties - பட்டறைப் பண்புகள்
mean free path - சராசரி மோதலிடைத் தூரம்
Neel temperature - நீல் வெப்பநிலை
non-linear - நேரியலற்ற
non – magnetic state - காந்தமற்ற நிலை
optic axis - ஒளியியல் அச்சு
optimum - பயன்தரு சிறுமம்
orientation - திசையமைவு
orthogonality - ஒருங்காமை
orthogonalization - ஒருங்காவாக்கம்
over lapping - மேற்பொருந்தியிருத்தல், கவிந்திருத்தல்
paramagnetism - பாராகாந்தம்
parameter - பண்பளவு
penetration depth - ஊடுருவல் ஆழம்
permeability - காந்த உட்புகுதிறன்
permittivity - மின் உட்புகுதிறன்
perturbation - சிற்றுலைவு
phase - அலைக்கட்டம்
phosphorescence - நின்றொளிர்தல்

photon - ஒளித்துகள், போட்டான்
photo current - ஒளிமின்னோட்டம்
polymer - பல்மம்
quantum - குவாண்டம், நுண்ணளவு அலகு
quantisation - நுண்ணளவாக்கம், குவாண்டமாக்கம்
refractive index - ஒளிவிலகலெண்
relaxation - தளர்வுறு நிலை, தளர்தல்
resistivity - மின்தடைத் தன்மை
reversible - இருபோக்குத் தன்மையுடைய
semiconductor - குறைக்கடத்தி
- n-type - எதிர்மின் வகை
- p – type - நேர்மின் வகை
spin - தற்சுழற்சி
spin wave - தற்சுழற்சி ஊடலை
spontaneous - தூண்டலற்ற
supercurrent - மீ மின்னோட்டம்
super conductor - மீக்கடத்தி
thin flim - மென்படலம்
transition temperature - பெயர்ச்சி வெப்பநிலை
- element - இடைநிலைத் தனிமம்
tunneling - ஊடுபாய்வு
upspin - மேல் நோக்கிய தற்சுழற்சி
vacancy - வெற்று இடநிலை
valence electron - இணைதிற எலக்ட்ரான்
- band - இணைதிற எலக்ட்ரான் பட்டை
valency - இணைதிறன்
vibration - அதிர்வு
virtual particle - மாயத்துகள்
- photon - மாய ஒளித்துகள்
visible - கட்புலனறி
wave function - அலைச்சார்பு
- Length - அலைநீளம்